

Bc. Jan Kubný

Využití technologie robotického navařování pro výrobu armatur

Application of Robotic Weld Deposition for production of Valves

Diplomová práce

Vedoucí práce:
Ing. Jindřich Kozák, Ph.D.

Ostrava 2021

Bibliografický záznam

Autor: Jan Kubný, KUB0502

Název práce: Využití technologie robotického navařování pro výrobu armatur

Studijní program: N0715A270007 Strojírenská technologie

Vedoucí práce: Ing. Jindřich Kozák, Ph.D.

Akademický rok: 2020/2021

Počet stran: 66

Klíčová slova: robotické navařování, WAAM, Obloukové svařování tavící se elektrodou v ochranném plynu, MIG/MAG

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

KUBNÝ, J. *Využití technologie robotického navařování pro výrobu armatur: diplomová práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechanické technologie, 2021, 66 s. Vedoucí práce: Kozák, J.

Diplomová práce se zabývá možnostmi robotického navařování. Teoretická část popisuje použitou svařovací metodu pro navařování v praktické části 135, robotizaci svařování a robotické navařování (WAAM). V praktické části je řešena výroba součásti. Nejprve byly stanoveny a ověřeny svařovací parametry mechanickým zkoušením, poté byl polotovár vyroben pomocí robotického navařování technologií WAAM. Tento polotovár byl obroben do finální podoby a pomocí nedestruktivních metod byl zjišťován možný výskyt vad.

Klíčová slova: robotické navařování, WAAM, obloukové svařování tavící se elektrodou v ochranném plynu, MIG/MAG

ANNOTATION OF THESIS

KUBNÝ, J. *Application of Robotic Weld deposition for Production Valves: Thesis*. Ostrava: VŠB – TU Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Mechanical Technology, 2021, 66 p. Thesis head: Kozák, J.

Thesis deals with the possibility of robotic weld deposition. The theoretical part describes used welding method for weld deposition in practical part 135, robotic welding and wire arc additive manufacturing. The practical part deals with production of component. Firstly, welding parameters were determined and verified by mechanical testing, then the semi-finished product was made by using wire arc additive manufacturing. This semi-finished product was machined into its final state and possible occurrence of defects was observed by using non-destructive testing.

Key words: robotic weld deposition, wire arc additive manufacturing, WAAM, gas metal arc welding, MIG/MAG

OBSAH

Seznam použitých značek.....	1
1 Úvod	2
2 Obloukové svařování tavící se elektrodou v ochranném plynu – 131, 135.....	3
2.1 Princip metody	3
2.2 Svařovací zařízení	4
2.2.1 Svařovací zdroj.....	4
2.2.2 Řídící jednotka	5
2.2.3 Svařovací hořák	5
2.2.4 Podavač drátu.....	6
2.3 Ochranné plyny	6
2.4 Svařovací parametry.....	7
2.4.1 Průměr elektrody.....	8
2.4.2 Průtok ochranného plynu	8
2.4.3 Svařovací proud	9
2.4.4 Svařovací napětí	9
2.4.5 Svařovací rychlost.....	10
2.4.6 Úhel náklonu elektrody při svařování.....	10
2.4.7 Vyložení elektrody	11
2.5 Přenos kovu v oblouku	11
2.5.1 Zkratový přenos.....	12
2.5.2 Kapkový přenos	12
2.5.3 Sprchový přenos	13
2.5.4 Impulzní přenos	13
2.6 Přídavné materiály	14
2.7 Svařitelnost korozivzdorných ocelí.....	14
3 Robotizace svařování.....	16
3.1 Mechanická část	17
3.2 Pohon.....	19
3.3 Senzory	19
3.4 Řízení robota	20
3.4.1 Bodové řízení	20

3.4.2	Kontinuální řízení.....	21
3.4.3	Dráhové řízení	21
3.5	Doporučení při využití svařovacích robotů.....	22
4	Wire arc additive manufacturing – WAAM	23
4.1	Postup výroby technologií WAAM	24
4.2	Metody nanášení vrstev	25
4.3	Problémy při výrobě technologií WAAM.....	27
4.3.1	Pórovitost	27
4.3.2	Trhliny a delaminace	28
4.3.3	Zbytkové napětí a deformace.....	28
4.4	Materiály pro WAAM	29
4.4.1	Oceli.....	29
4.4.2	Slitiny hliníku	29
4.4.3	Slitiny niklu	29
4.4.4	Slitiny titanu.....	30
5	Experimentální část	31
5.1	Svařovací drát – G 19 12 3 L Si.....	32
5.2	Robotizované pracoviště	32
5.3	Stanovení svařovacích parametrů	34
5.4	Ověření geometrických parametrů	36
5.5	Destruktivní zkoušení návaru	37
5.5.1	Zkouška tahem	39
5.5.2	Zkouška rázem v ohybu	40
5.5.3	Zkouška ohybem.....	41
5.6	Výroba součástí	42
5.7	Nedestruktivní zkoušky	45
5.7.1	Vizuální kontrola.....	46
5.7.2	Kapilární zkouška	47
5.7.3	Rentgenová zkouška	49
6	Závěr	51
7	Seznam použité literatury	52
8	Seznam příloh.....	54

SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK

Značka	Popis	Jednotka
A	tažnost	%
d	průměr elektrody	mm
I	svařovací proud	A
KV	nárazová práce	J
L	vyložení elektrody	mm
m	korekce napětí	V
Q	vnesené teplo	kJ/mm
R _m	mez pevnosti	Mpa
R _{p0.2}	smluvní mez kluzu	Mpa
U	svařovací napětí	V
v	svařovací rychlost	mm/s
Z	kontrakce	%
CMT	cold metal transfer	-
CP	continuous-path	-
DED	directed energy deposition	-
MAG	metal active gas	-
MAT	medial axis transformation	-
MIG	metal inert gas	-
PA	poloha vodorovná shora	-
PB	poloha vodorovná šikmo shora	-
PLC	programmable logic controller	-
PTP	point-to-point	-
TIG	tungsten inert gas	-
WAAM	wire arc additive manufacturing	-

1 ÚVOD

Rostoucí poptávka po nových produktech a konkurence na trhu vyvíjí tlak na inovaci výrobních metod, zvyšování hodnoty výrobku a snížení nákladů na výrobu. Mezi progresivní metody patří aditivní výroba, která našla své místo v průmyslu díky své schopnosti vytvářet výrobky s komplexní geometrií a minimalizovat obráběcí operace a spotřebu materiálu. Aditivní výroba neboli 3D tisk je automatizovaný výrobní proces pro vyrábění trojrozměrných objektů, založený na postupném přidávání jednotlivých vrstev, ať už jde o kov, plast, beton nebo jakýkoliv jiný materiál.

Robotické navařování, častěji známé pod anglickou zkratkou WAAM (wire arc additive manufacturing), patří mezi technologie aditivní výroby, která jsou relativně nové a doposud se vyvíjí. Tato metoda si získala pozornost především díky vysoké rychlosti nanášení vrstev a nižším nárokům na materiál. Přesnost výrobku je, v porovnání s jinými metodami 3D tisku, relativně nízká. Pokud jsou požadovány přesné rozměry součásti, musí se výrobek obrábět. Jak už vyplývá z anglického názvu, tato technologie využívá k nanášení vrstev obloukového svařování, proto při výrobě s technologií WAAM je důležité mít znalosti v této oblasti. Pro navařování lze využít metodu 131/135 (MIG/MAG), 141 (TIG) nebo 151 (plazmové svařování). V teoretické části je řešena robotizace svařování, jejíž rozvoj v posledních letech umožnil vznik metody WAAM, kdy průmyslový robot postupně navařuje vrstvu po vrstvě a vytváří polotovary. V závěru teoretické části je popsána samotná metoda WAAM.

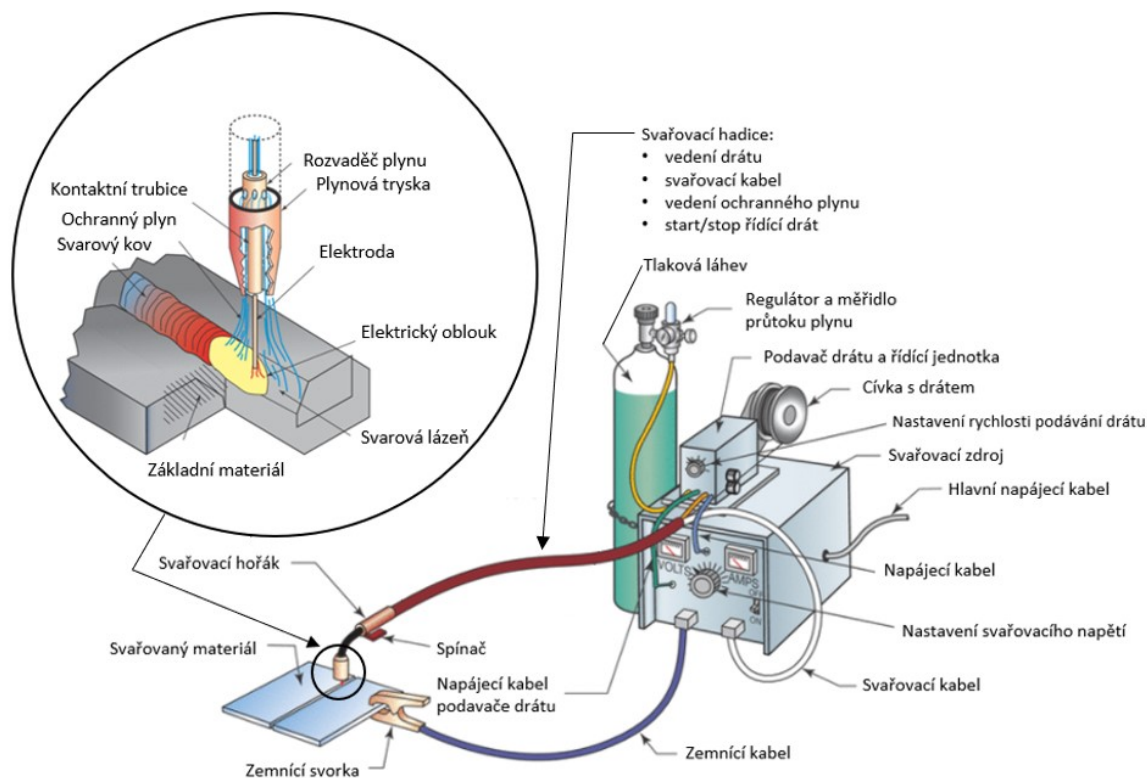
V experimentální části této diplomové práce byla použita svařovací metoda 135, která je v úvodu teoretické části popsána. Cílem experimentu bylo ověřit svařovací parametry a zhotovit součást Hrdlo (viz příloha 1). Polotovar pro součást byl vyrobený metodou WAAM a pak se obráběl na požadované rozměry. Obrábění probíhalo ve spolupráci se společností MSA, a.s., Dolní Benešov, která se zabývá výrobou průmyslových armatur. Ve společnosti probíhaly i nedestruktivní zkoušky, díky kterým bylo možné zhodnotit správnost postupu a určit chyby, kterým se v budoucnu vyhnout.

2 OBLOUKOVÉ SVAŘOVÁNÍ TAVÍCÍ SE ELEKTRODOU V OCHRANNÉM PLYNU – 131, 135

Obloukové svařování tavící se elektrodou v ochranném plynu je proces využívající elektrický oblouk jako zdroj tepla. Elektrický oblouk hoří mezi základním materiálem a elektrodou, která se odtavuje. Proces zahrnuje použití ochranného plynu, který zamezuje přístupu vzduchu do svarové lázně. Základní koncept této metody byl vyvinut ve 20. letech 20. století. Komerčně použitelná se tato metoda stala až koncem 40. let 20. století. Metoda byla primárně používána pro svařování hliníku a jeho slitin [1]. Avšak následný vývoj vedl k širšímu využití a díky své všestrannosti začalo obloukové svařování tavící se elektrodou v ochranném plynu nahrazovat ruční obloukové svařování při různých aplikacích [2]. Hlavní příčinou byla možnost metodu využít pro poloautomatické a automatické aplikace. Při správné kombinaci elektrod, ochranného plynu a svařovacích parametrů lze svařovat všechny komerčně důležité materiály jako je nelegovaná či legovaná ocel, hliník, měď, titan, nikl atd. Tyto vlastnosti dělají metodu zvláště vhodnou pro vysoce-produktivní aplikace. To vše se ukázalo při zvýšeném využití svařovacích robotů [1]. V dnešní době tak patří tato metoda mezi nejvyužívanější a lze ji nalézt při výrobě ocelových konstrukcí, kotlů a tlakových nádob a také v automobilovém, chemickém a strojírenském průmyslu [2].

2.1 Princip metody

Princip metody lze vidět na obrázku 2.1. Elektroda je ve formě kovového drátu přiváděna konstantní rychlostí do svařovacího hořáku pomocí hnacího mechanismu. Drát ve svařovacím hořáku prochází kontaktní trubicí, kde na něj přechází elektrická energie. Obvykle je kontaktní trubice připojena ke kladnému pólu a základní materiál k zápornému pólu. Elektrický oblouk se formuje mezi základním materiálem a elektrodou [3]. Vzniká průchodem elektrického proudu ionizovaným plynem. Vysoká intenzita elektrického pole způsobuje rozpad atomů a molekul a jsou ionizovány ztrátou elektronů. Elektrická vodivost média se tak zvýší a je umožněn průchod elektrického proudu. Pozitivní ionty plynu poté proudí z kladného pólu k zápornému a elektrony proudí ze záporného pólu ke kladnému. Teplo elektrického oblouku natavuje základní materiál i elektrodu [4]. Po ztuhnutí vzniká svar. Ochranný plyn, který je důležitý i z hlediska ionizace, se nejčastěji dodává v tlakových láhvích a je přiváděn do trysky ve svařovacím hořáku. Při vyšších proudech je nutnost použít chladicí jednotky [3].



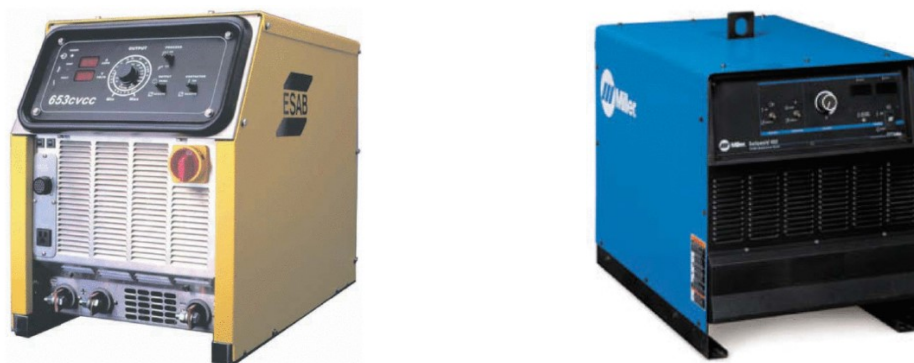
Obrázek 2.1 – Schéma obloukové svařování tavící se elektrodou v ochranném plynu [5]

2.2 Svařovací zařízení

Jak lze vidět na obrázku 2.1, vybavení pro obloukové svařování tavící se elektrodou v ochranném plynu se skládá ze svařovacího zdroje, řídicí jednotky, podavače drátu, svařovacího hořáku, svařovacích hadic a kabelů tlakové láhve s plynem. Pro automatizované operace je potřeba přidat další vybavení, jako je například zařízení zajišťující pohyb hořáku [4].

2.2.1 Svařovací zdroj

Svařovací zdroj poskytuje elektrickou energii o správné velikosti napětí a proudu pro vznik a udržení elektrického oblouku. Pro většinu aplikací 131 a 135 se využívá stejnosměrný proud. Mezi zdroje stejnosměrného proudu patří svařovací agregáty, usměrňovače a invertory [4]. Svařovací agregáty jsou tvořeny dynamem, které je poháněno nejčastěji spalovacím motorem. Lze je tak i použít na místech, kde není možnost připojit svařovací zdroj na elektrickou síť. Přestože produkují stabilní oblouk, tak se v dnešní době využívají pouze výjimečně, protože jsou hlučné, jsou neefektivní a neekonomické [6]. Více používané jsou svařovací usměrňovače. Skládají se z transformátoru a usměrňovacích prvků, které jsou schopné měnit střídavý proud na stejnosměrný. Svařovací usměrňovače nejsou hlučné, mají vyšší účinnost než svařovací agregáty a jsou schopné rychle reagovat na změnu svařovacích parametrů [4]. Svařovací invertory jsou nejmodernějšími typy zdrojů. Usměrňují proud ze sítě na vysokofrekvenční střídavý proud. Tento vysokofrekvenční proud se poté transformuje a usměrní na stejnosměrný proud použitelný pro svařování. Výhodou je nízká hmotnost, stabilní oblouk a vysoká účinnost [6].



Obrázek 2.2 – Svařovací zdroje [4]

2.2.2 Řídící jednotka

Úkolem řídicí jednotky je regulovat vzájemnou součinnost svařovacího zdroje s podavačem drátu a přísunem ochranného plynu. Slouží pro nastavování svařovacích parametrů a pomocí displeje je lze upravovat. Řídící jednotka může fungovat i jako knihovna programů. Může také poskytovat záznam vybraných parametrů při svařování [6]. U ručního svařování při stisknutí spínače na hořáku řídicí jednotka aktivuje proud, podávání drátu a proudění ochranného plynu. U automatizovaných operací je vše řízené externím počítačem. Pro speciální aplikace lze řídicí jednotky naprogramovat [4].

2.2.3 Svařovací hořák

Svařovací hořák určuje místo svařování, obstarává napájení drátu elektrickým proudem a přivádí ochranný plyn. Může být chlazený procházejícím ochranným plynem nebo vodou. Volba chlazení závisí na použitém ochranném plynu a svařovacích parametrech [4]. Typický hořák pro ruční svařování lze vidět na levé straně obrázku 2.3. Skládá se z těla hořáku, spínače, nástavce, pouzdra pro rozvádění plynu, kontaktní trubice a plynové trysky. K tělu hořáku je připevněný nástavec. Tyto nástavce jsou k dispozici v různých úhlech a volí se podle druhu svařovací operace. Nástavec je dutý a je jím vedený drát a ochranný plyn. Na jeho konci je umístěná měděná kontaktní trubice. Ta je spojena se svařovacím zdrojem pomocí kabelů a přenáší elektrický proud na drát. Tento díl se opotřebovává a je nutné ho po čase měnit. Plynová tryska je dutá kovová trubka umístěná na konci hořáku. Obklopuje kontaktní trubici a usměrňuje proudění ochranného plynu do svarové lázně. Na pravé straně obrázku 2.3 je vidět hořák pro automatizované operace, jediný rozdíl oproti hořákům pro ruční operace je absence spínače [5].



Obrázek 2.3 – Části svařovacího hořáku a svařovací hořák pro automatizované operace [5]

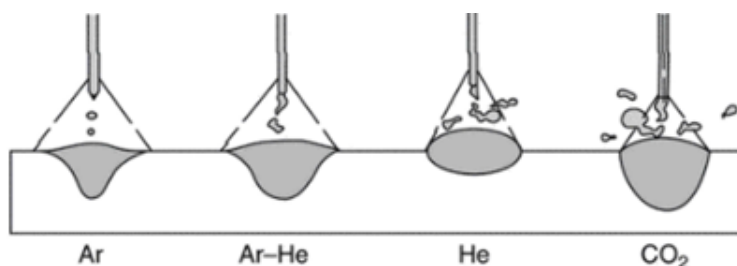
2.2.4 Podavač drátu

Účelem podavače drátu je zajistit stálý, rovnoměrný přísun drátu skrz svařovací kabely a hořáku do svarové lázně. Většina podavačů drátu u metod 131 a 135 pracuje s konstantní rychlosti podávání, které se používají v kombinaci se zdroji s konstantním napětím. To znamená, že se rychlost posuvu drátu nastavuje před svařováním. Podavač drátu obsahuje elektrický motor, hnací válce a další příslušenství pro správnou funkci podávání [4]. Hnací válce mají po celém obvodu drážku, která může mít tvar V nebo U s hladkým nebo vroubkovaným povrchem. Pro dráty z oceli se používá V drážka, pro měkké dráty hliníku nebo mědi, se používá drážka U. Pro větší průměry drátu se využívá drážka vroubkovaná [5]. Podavače drátu používají tlačný, tažný nebo tažně-tlačný systém v závislosti na materiálu drátu a vzdálenosti mezi cívkou s drátem a svařovacím hořákem. U tlačného systému je drát odebírán hnacími válci a je tlačný až do svařovacího hořáku. Tento systém se využívá pro menší vzdálenosti a dráty z oceli. Tažný systém má hnací válce umístěné ve svařovacím hořáku. Systém může vést drát do větších vzdáleností a je vhodnější pro měkké materiály. Většina automatizovaných operací využívá právě tento systém. Kombinace těchto dvou systémů je vhodná pro velice měkké materiály.

2.3 Ochranné plyny

U obloukového svařování je ochranný plyn důležitým prvkem celého procesu. Jeho hlavním úkolem je chránit oblouk a svarovou lázeň před atmosférou [4]. To je nezbytné, protože většina kovů má tendenci při zahřátí na teplotu tavení tvořit oxidy a v menší míře nitridy. Jejich vznik může mít negativní vliv na formování svaru. Hrozí zkřehnutí svarového spoje a vznik porozity [1]. Rozlišují se 2 typy ochranných plynů – aktivní a inertní. Podle nich se obloukové svařování v tavicí se elektrodě dělí na MIG (Metal Inert Gas) a MAG (Metal Active Gas), což jsou v podstatě totožné metody, kdy jediný rozdíl je v použití jiného typu ochranného plynu. Inertní plyny jako jsou argon a helium se svarovou lázní nereagují. Naopak aktivní plyny se aktivně podílí na procesech ve svarové lázni a mohou s kovy tvořit sloučeniny. Do skupiny aktivních plynů patří oxid uhličitý, kyslík, dusík a jejich směsi. Ochranný plyn se volí podle:

- druhu svařovaného materiálu,
- typu přenosu kovu v oblouku,
- rychlosti svařování,
- hloubky závaru, šířky a tvaru svarové housenky,
- ceny [4].



Obrázek 2.4 – Vliv ochranného plynu na profil svarové housenky [7]

Argon je chemicky inertní plyn a podporuje stabilní oblouk [4]. Lze relativně jednoduše ionizovat a může tak vést delší elektrické oblouky (podporuje vznik sprchové přenosu kovu) i při nižších hodnotách napětí [5]. Vnitřní část oblouku při použití argonu disponuje vyšší energií než část vnější. Tento rozdíl významně ovlivňuje tvar svarové housenky, která se vyznačuje nepravidelným profilem a hlubokým závarem. To lze vidět na obrázku 2.4 [1]. Čistý argon lze použít pro svařování neželezných kovů jako je hliník, měď, hořčík, nikl a jejich slitiny [5]. Čistý argon není vhodný pro svařování oceli, ale při jeho smíchání s malým množstvím kyslíku (1-5 %) nebo oxidu uhličitého (2-3 %) je možnost tyto směsi použít pro vysoce legované oceli [8]. Pro svařování nelegovaných a nízkolegovaných ocelí se používají směsi s oxidem uhličitým v rozsahu 10-25 % [4]. Vícesložkové směsi bohaté na argon se v praxi ověřily pro vysoce produkční aplikace na robotizovaných pracovištích. [1].

Stejně jako argon je hélium chemicky inertní plyn. Aby se dosáhlo účinné ochrany svarové lázně při použití hélia, je potřeba aplikovat vyšší průtok. Důvodem je nízká hustota hélia. Použitím hélia lze dosáhnout všech typů přenosu kovu [4]. Hélium má vysoký ionizační potenciál, tím pádem vyžaduje vyšší napětí k ionizaci, což má za následek oblouk o větší teplotě. To dělá z hélia optimální plyn pro svařování větších tloušťek a materiálů s vysokou tepelnou vodivostí jako měď, hliník a hořčík [5]. Hélium poskytuje širší svarovou housenku o parabolickém profilu, jak lze vidět na obrázku 2.4 [1]. Čisté helium se používá jen při speciální aplikacích. Častěji se používá ve směsích jako je například argon + hélium, kdy se využívá pozitivních vlastností obou plynů [5].

Oxid uhličitý je jediný reaktivní plyn, který lze samostatně použít jako ochranu svarové lázně. Má široké uplatnění při svařování uhlíkových a nízkolegovaných ocelí. Použití oxidu uhličitého nabízí výhody jako je pravidelný hluboký závar, možnost použít větší rychlost svařování a nízké náklady [1]. Lze dosáhnout pouze zkratového nebo kapkového přenosu kovu v oblouku. Sprchového přenosu dosáhnout nelze. Oxid uhličitý zvětšuje podíl uhlíku ve svaru. To může mít negativní vliv na vlastnosti ocelí, proto většina elektrod pro svařování tímto plynem obsahuje dezoxidadla. Tím se zabrání vzniku vad [4]. Jak lze vidět na obrázku 2.4 použitím oxidu uhličitého se dosáhne hlubokého závaru s oválným profilem převýšení a nepravidelným povrchem svarové housenky [1].

2.4 Svařovací parametry

Existuje mnoho parametrů, které ovlivňují kvalitu svaru a geometrii průřezu svarové housenky. Jejich správný výběr usnadní svářeči práci a zvýší pravděpodobnost dosažení požadovaných vlastností spoje. Výběr těchto parametrů se provádí poté, co je zvolen základní materiál, přídavný materiál a geometrie svarových ploch [4]. Tyto parametry nejsou zcela nezávislé, proto je často potřeba při změně jednoho upravit další parametry [1]. Parametry můžeme rozdělit do třech hlavních skupin:

- fixní parametry,
- primární nastavitelné parametry,
- sekundární nastavitelné parametry [4].

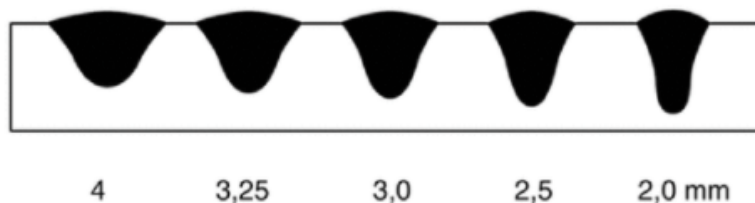
Do skupiny fixních parametrů patří ty, které jsou zvoleny před samotným svařováním a nedají jednoduše změnit, když svařování začne. Jedná se o parametry jako je průměr elektrody, již zmíněný typ ochranného plynu a jeho průtokové množství. Určují se podle typu a tloušťky základního materiálu, polohy svařování a požadovaných mechanických vlastností [4].

Primární nastavitelné parametry jsou hlavními parametry, používanými k řízení svařování po výběru parametrů fixních. Mají velký vliv na tvorbu svarové housenky, stabilitu oblouku a kvalitu svaru. Snadno se měří a lze je nastavovat v širokém rozsahu. Patří zde svařovací proud, napětí a rychlost [4].

Sekundární nastavitelné parametry mohou být použity k řízení svařovacího procesu. Vliv na formaci svarové housenky nemusí být tak zřejmý. Často ovlivňují primární nastavitelné parametry, takže tvar svarové housenky ovlivňují nepřímo. Tyto parametry jsou vyložení a úhly elektrody [4].

2.4.1 Průměr elektrody

Šířka svarové housenky se odvíjí od použitého průměru elektrody. Každý průměr elektrody daného chemického složení má určen použitelný rozsah svařovacího proudu. Elektrody s větším průměrem mohou používat větší svařovací proudy, mají větší výkon odtavení a jsou schopny větší hloubky závaru [4]. Při konstantním svařovacím proudu a zmenšujícím se průměru elektrody se elektroda bude rychleji odtavovat, zvětšuje se hloubka závaru (viz obrázek 2.5) a oblouk bude stabilnější [1]. Příčinou je větší proudová hustota. Průměr elektrody se volí podle tloušťky svařovaného materiálu, výkonu navařování, polohy svařování a v neposlední řadě na nákladech [4].



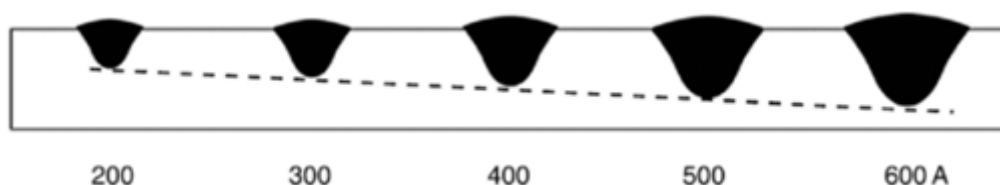
Obrázek 2.5 – Vliv průměru drátu na profil svarové housenky [3]

2.4.2 Průtok ochranného plynu

Průtok ochranného plynu má velký vliv na výslednou kvalitu svarového spoje. Pokud je průtok příliš nízký, svarová lázeň nemusí být pořádně chráněna před kontaminací atmosférou. Stejný efekt má nadměrně vysoký průtok, kdy hrozí vznik turbulencí při výstupu plynu z trysky svařovacího hořáku. Kyslík a dusík se mísí s ochranným plynem a kontaminují svarovou lázeň. To vede k možnému vzniku pórů, bublin a dalším defektům. Optimální velikosti průtoku pro dokonalou ochranu svarové lázně se odvíjí od hustoty ochranného plynu, typu svařovaného materiálu, pozici svařování a rychlosti svařování [1]. Případně i na povětrnostních podmínkách při svařování na montážích [2].

2.4.3 Svařovací proud

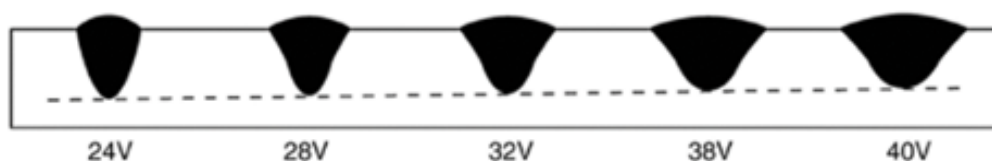
Svařovací proud má největší vliv na velikost a geometrii svarové housenky. Vyšší proudy vedou k většímu generaci tepla a většímu natavení materiálu [2]. U svařování tavící se elektrodou v ochranném plynu je proud nepřímo nastaven pomocí rychlosti podávání drátu a jeho průměrem [3]. S rostoucí rychlostí podávání drátu musí zdroj zvýšit hodnotu proudu, aby se drát rychleji natavil. Z toho vyplývá, že svařovací proud je přímo úměrně závislý na rychlosti podávání drátu. Množství proudu potřebného na danou rychlost je funkcí průměru elektrody. Při dané rychlosti posuvu drátu větší průměry vyžadují vyšší proud než dráty menšího průměru, aby se docílilo stejné výkonu odtavení [7]. Velikost svařovacího proudu se kromě průměru elektrody odvíjí i od chemického složení elektrody a polohy svařování. Pokud všechny parametry budou konstantní, tak při zvyšování proudu dosáhneme většího výkonu odtavení, hlubšího závaru a svarová housenka bude celkově větší (viz obrázek 2.6) [1]. Při použití nadměrně velkého svařovacího proudu hrozí protavení základního materiálu, vznik horkých trhlin, zápaly a další defekty. Při použití nízkých hodnot proudu se elektroda lepí a nedosáhne se dostatečné hloubky závaru. Hodnoty proudů u této metody se pohybují mezi 50-500 A [4].



Obrázek 2.6 – Vliv svařovacího proudu na profil svarové housenky [3]

2.4.4 Svařovací napětí

Snahou je regulovat délku elektrického oblouku, ta se však obtížně měří. Při udržování ostatních parametrů na konstantní hodnotě se délka oblouku mění se změnou napětí. Existuje tak mezi nimi určitá závislost a reguluje se proto napětí oblouku [9]. Nastavení potřebného napětí závisí na typu ochranného plynu, základního materiálu a přenosu kovu v oblouku. [1]. Obecně platí, že zvyšováním velikosti napětí se svarová housenka stává širší a plošší (viz obrázek 2.7). Toho lze využít pro překlenutí širších mezer a pro zvýšení promísení základního kovu s přídavným materiálem. Nadměrné napětí způsobuje velký rozstřík, tvoří se póry a zápaly [3]. Při nižších hodnotách napětí bude housenka užší s větším převýšením svaru a hlubším závarem. U příliš nízkých hodnot napětí je proces nestabilní a tvoří se defekty převážně na krajích svarové housenky [4]. Pro dosažení nejpriznivější charakteristiky oblouku a tvaru svarové housenky je potřeba provést zkušební chody a napětí doregulovat. Hodnoty napětí se u metod s tavící se elektrodou nejčastěji pohybují mezi 14-40 V [1].



Obrázek 2.7 – Vliv svařovacího napětí na profil svarové housenky [3]

2.4.5 Svařovací rychlost

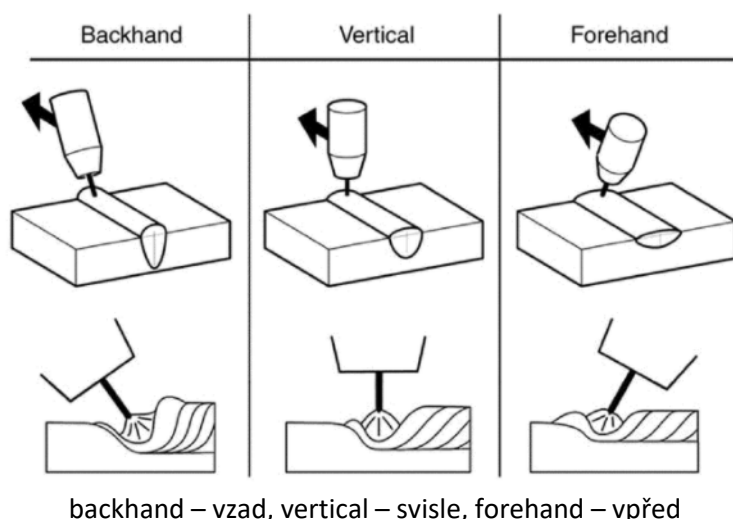
Svařovací rychlost má vliv na šířku svaru a hloubku závaru [3]. Největší hloubky závaru dosáhneme při určité rychlosti svařování. Ta závisí na nastavení svařovacího proudu, napětí, typu ochranného plynu a poloze svařování. Odkloněním od této rychlosti dosáhneme menší hloubky závaru (viz obrázek 2.8) [1]. Při nižších rychlostech se natavuje více přídavného materiálu, což vytváří širokou a mělkou svarovou lázeň. Oblouk nenatavuje přímo základní materiál, ale naráží na svarovou lázeň. To způsobuje vznik širokého svaru s velkým převýšením a možnosti vzniku horkých trhlin [4]. Při zvýšení rychlosti se snižuje množství přeneseného tepla na základní materiál, dostatečně se nenatavuje a hloubka závaru je tak nižší. Při použití příliš vysokých rychlostí vznikají zápaly, póry a další defekty [1]. Při volbě rychlosti chceme dosáhnout co nejvyšší produktivity, přitom je třeba dbát na dosažení požadované kvality svaru.



Obrázek 2.8 – Vliv svařovací rychlosti na profil svarové housenky [10]

2.4.6 Úhel náklonu elektrody při svařování

Úhel náklonu elektrody definujeme jako polohu elektrody od směru svařování. Nastavením úhlu se ovlivňuje tvar svarové housenky tak i hloubku závaru (viz obrázek 2.8) [4]. Když elektroda směřuje od směru svařování, označuje se to jako svařování vzad a se směrem svařování svírá ostrý úhel. Při svařování vzad není možnost sledovat svarovou mezeru, ale umožňuje pozorování formování povrchu svaru. Svarová housenka je užší a dosahuje se větší hloubky závaru. Převýšení svarové housenky bývá vyšší s drsnějším povrchem. Úhel elektrody se pohybuje v rozmezí 60-70°. V opačném případě, kdy elektroda směřuje ve směru svařování, se tato technika označuje jako svařování vpřed a se směrem svařování svírá tupý úhel. Při svařování vpřed má svářeč výhled na svarovou mezeru, ale nevidí, jak se formují housenky. Teplo oblouku působí na větší plochu základního materiálu, a proto je větší šířka housenky, menší hloubka závaru a hladší povrch svaru [2]. To je taky důvod, proč je tato technika vhodná pro svařování tenkých plechů [5]. Obvykle se používá úhel v rozmezí 110-125° [2]. Třetí možností je svařování kolmo na povrch. To se využívá zpravidla pro robotické aplikace jako je například technologie WAAM především proto, že není potřeba měnit úhel svařovacího hořáku při změně směru svařování. Není to však pravidlem. Profil svarové housenky u svařování kolmo na povrch je rovnoměrný, kdy se nedosahuje její velké šířky ani příliš hlubokého závaru [5].



Obrázek 2.9 – Vliv úhlu elektrody na profil svarové housenky [3]

2.4.7 Vyložení elektrody

Vyložení elektrody je rozměr mezi koncem kontaktní trubice a koncem elektrody [1]. Při nastavení malého rozměru vyložení se zvyšuje riziko přivaření elektrody ke kontaktní trubici [3]. Zvětšováním tohoto rozměru roste i elektrický odpor elektrody a více se zahřívá. Elektrický proud, procházející skrz elektrodu a oblouk, zvyšuje napětí na zdroji. Zdroj na to reaguje jeho snížením [9]. Tím klesá množství tepla, přičemž množství nataveného materiálu je stejné. Pokud se zvolí příliš vysoké vyložení, elektroda se bude tavit při nízké teplotě. To snižuje hloubku závaru a má negativní vliv na geometrii svaru. Dobré pravidlo je držet tuto délku konstantní během procesu svařování [3]. Vyložení se volí na základě typu přenosu kovu a použitého ochranného plynu. Například pro oxid uhličitý lze vzdálenost určit podle vztahu [6]:

$$L = 5 + 5 \cdot d \text{ [mm]} \quad (1)$$

Pro směsné plyny se pak délka volí podle vztahu [6]:

$$L = 7 + 5 \cdot d \text{ [mm]} \quad (2)$$

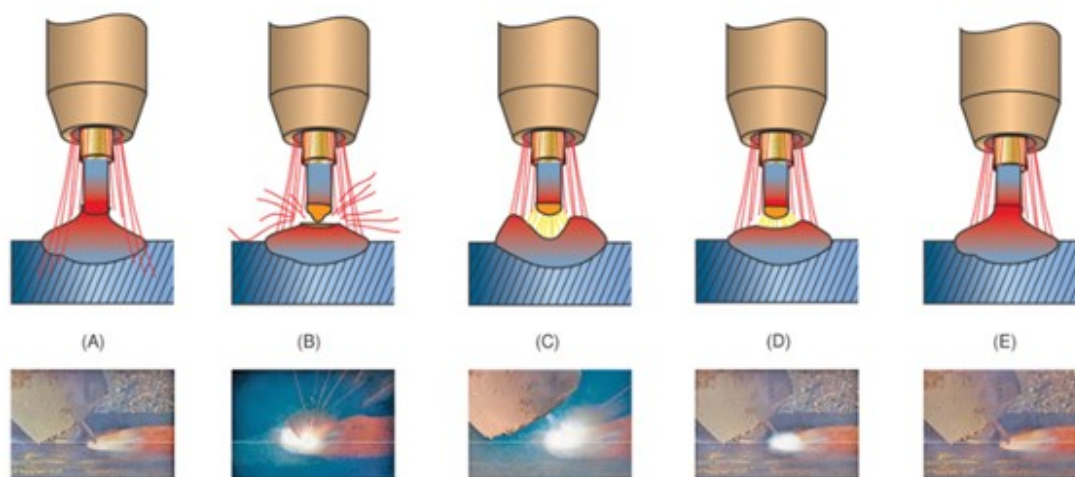
Kde d je průměr elektrody [mm].

2.5 Přenos kovu v oblouku

Přenos kovu v oblouku je mechanismus, kterým se roztavený kov přenáší přes oblouk do svarové lázně. Způsoby přenosu kovu mohou být: zkratový, kapkový, sprchový nebo impulzní. Každý z nich má své výhody a aplikace. Způsob přenosu kovu především určuje svařovací proud a napětí. V potaz se musí brát i použitý ochranný plyn, kdy nelze dosáhnout všech typů přenosu ve všech plynech [4].

2.5.1 Zkratový přenos

Zkratový přenos kovu je nejpoužívanějším typem přenosu. Používají se nejnižší hodnoty svařovacího proudu v rozmezí 35-225 A a napětí 14-23 V, díky tomu je i výkon odtavování nízký [10]. Zkratový přenos kovu vytváří malou rychle tuhnoucí lázeň, z tohoto důvodu ho lze použít pro všechny svařovací polohy [4]. Nejčastěji se používá ochranná atmosféra oxidu uhličitého nebo jeho směsi s argonem. Princip zkratového přenosu kovu lze vidět na obrázku 2.10. Po vytvoření oblouku mezi elektrodou a povrchem základního materiálu vzniká malá svarová lázeň. Rychlost podávání elektrody je však větší než rychlost jejího tavení a oblouk ji nestihá odtavovat. Vzdálenost mezi elektrodou a svarovou lázní se zmenšuje do doby, než dojde ke kontaktu. Po kontaktu dochází ke zkratu a elektrický oblouk zhasne. Zkrat generuje velké množství tepla díky čehož se odtaví část elektrody do svarové lázně a oblouk se obnoví. Nastává stejná situace, kdy elektroda se nestihá odtavovat až dojde ke kontaktu a proces se znova opakuje. K tomu dochází 20-200krát za minutu v závislosti na velikosti proudu a pokaždé zanechá část roztavené elektrody ve svarové lázni [5].



Obrázek 2.10 – Schéma zkratového přenosu [5]

2.5.2 Kapkový přenos

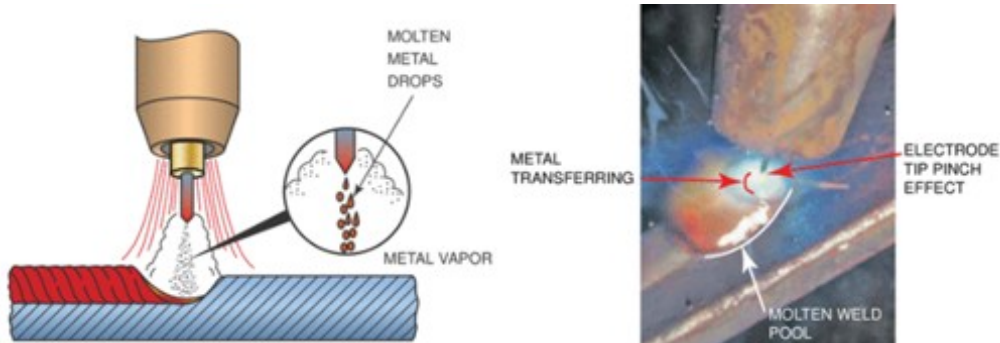
Při nižších svařovacích proudech, než jsou potřebné pro sprchový přenos (190-300 A), a napětí vyšších, než je u zkratové přenosu (22-28 V), se nachází přechodová oblast. Ta se vyznačuje tvorbou velkých nepravidelných kapek, které vznikají tavením elektrody elektrickým obloukem [3]. Poté, co kapka dosáhne kritické velikosti, její povrchové napětí ji už neudrží na konci elektrody, odděluje se a přenáší se elektrickým obloukem do svarové lázně [5]. To lze vidět na obrázku 2.11. Přestože tohoto přenosu kovu lze dosáhnout u všech typů plynů, využívá se jen omezeně pro svařování středních tloušťek. Důvodem je značné množství nevýhod jako je méně stabilní oblouk, velký rozstřík nebo nevhodnost pro všechny svařovací polohy, jiné než vodorovné shora. Kapkový přenos tak nemusí být optimální volbou pro komerční výrobu [4].



Obrázek 2.11 – Schéma kapkového přenosu [5]

2.5.3 Sprchový přenos

Sprchového přenosu lze dosáhnout pouze v inertních plynech nebo směsích bohatých na argon. Je spojen s vysokými hodnotami svařovacího proudu v rozsahu 200-500 A a napětí 28-40 V [10]. Svařovací proud je dostatečně velký, aby se konec elektrody rapidně odtavoval a vytvářely se jemné kapičky, jak lze vidět na obrázku 2.12 [5]. Tyto kapičky se přenášejí do svarové lázně a jsou urychlovány obloukovými silami [1]. Sprchový přenos je typický vnášením velkého množství tepla do základního materiálu a lze tak dosáhnout velké hloubky závaru, který přímo úměrně roste s hodnotou svařovacího proudu. Oblouk je stabilní a tvoří se malé množství rozstřiku. Svařování je limitované jen pro vodorovné polohy. Za dodržení určitých podmínek lze svařovat i v jiných polohách [6].



Obrázek 2.12 – Schéma sprchového přenosu [5]

2.5.4 Impulzní přenos

Impulzní přenos kovu je proces řízený mikroprocesorem svařovacího zdroje. Svařovací proud v pravidelných intervalech pulzuje mezi dvěma hodnotami. Nižší hodnota proudu (5-50 A) je v oblasti kapkového přenosu a udržuje elektrický oblouk, aniž by došlo k natavení konce elektrody. Umožňuje tak svarové lázni mírně zchladnout. Vyšší hodnota proudu (90-320 A) má amplitudu v oblasti sprchového přenosu kovu a zajišťuje odtavování elektrody, kdy se přenesou do svarové lázně části přídavného materiálu. Pomocí frekvence a amplitudy pulzu svařovacího proudu lze řídit množství vneseného tepla a tím i výkon odtavování [4]. Díky snížení vneseného tepla je možné svařovat i tenké plechy při využití vlastností sprchového přenosu kovu. Svařovat lze ve všech polohách a rozstřik je malý. Tento typ přenosu kovu je velice výhodný pro svařování hliníku a vysokolegovaných ocelí [6].

2.6 Přídavné materiály

Jako přídavný materiál (elektroda) pro metody 131 a 135 se používá plný drát. Tyto elektrody se nejčastěji vyrábějí v rozměrech o průměru 0,6; 0,8; 1,0; 1,2; 1,6 nebo 2,4 mm. Dodávají se v cívkách o hmotnosti 5, 15, 16, 18 kg pro ruční svařování a pro robotizované aplikace 250 a 500 kg. Povrch drátu je opatřen tenkým měděným povlakem nebo je vyleštěný, což zlepšuje kontakt drátu s kontaktní trubicí hořáku a tím se zlepší přenos proudu mezi nimi. Měděný povlak zároveň chrání drát před korozí [10]. Pro svařování ocelí obsahují skoro všechny dráty dezoxidační a další legující prvky, aby se zamezilo vzniku pórů a zlepšily mechanické vlastnosti. Správné množství dezoxidujících prvků je především důležité při použití ochranných plynů obsahující kyslík nebo oxid uhličitý [4]. Výběr správného přídavného materiálu pro konkrétní aplikaci se volí na základě:

- pevnosti základního materiálu – pevnost svarového kovu by měla být stejná nebo o stupeň lepší než pevnost základního materiálu. Tohle je nejdůležitější faktor při výběru přídavného materiálu pro svařování uhlíkových a nízkolegovaných ocelí.
- chemického složení základního materiálu – stejné chemické složení je zapotřebí tehdy, když je potřeba, aby svarový kov měl stejné vlastnosti jako základní materiál. Je to důležitý faktor při výběru přídavného materiálu pro svařování korozivzdorných ocelí a neželezných kovů.
- tloušťky a tvaru základního materiálu – svařované materiály mohou mít větší tloušťku nebo složitější tvar. Zvolený přídavný materiál by měl mít velkou tažnost, aby se předešlo praskání.
- provozních parametrů – pokud jsou svařované díly vystaveny náročným podmínkám, jako jsou nízké nebo vysoké teploty či dynamické namáhání, měl by být použitý přídavný materiál, který je schopný stejně odolávat těmto náročným podmínkám [4].

2.7 Svařitelnost korozivzdorných ocelí

Korozivzdorné oceli jsou ty, které obsahují minimálně 12 % chromu. Při této koncentraci chromu se na povrchu oceli tvoří tvrdá oxidická vrstva, která chrání materiál před další korozí nebo oxidací. Pro zlepšení korozivzdornosti se přidávají další legující prvky, hlavně nikl a molybden. Tyto legující prvky lze rozdělit do hlavních dvou skupin – austenitotvorné (Ni, Mn, C, N) a feritotvorné (Cr, Mo, Si, Nb). V závislosti na množství těchto prvků se liší struktura nerezových ocelí, to jim dává odlišné fyzikální a mechanické vlastnosti, odolnost proti korozi a mají různou svařitelnost. Nerezové oceli dělíme na austenitické, feritické, martenzitické a duplexní [3].

Austenitické oceli obsahují 12-27 % chromu, 7-30 % niklu, méně než 0,05 % uhlíku a často obsahují 2-3 % molybdenu. Mají vynikající svařitelnost a lze je svařovat všemi obvyklými metodami [3]. Při jejich svařování je potřeba vyhnout se precipitaci karbidu na hranicích zrn, která se vyskytuje při teplotách 540-870 °C [4]. Karbidy jsou bohaté na chrom, snižují jeho koncentraci v okolním austenitu a vytvářejí tak podmínky pro vznik mezikrystalové koroze. Čím více je uhlíku v oceli, tím více se karbidy tvoří [3].

Proto je vhodné použít základní a přídavný materiál s co nejmenším obsahem uhlíku. Zároveň by se svařenec měl co nejméně držet ve výše uvedené teplotě, a to limitováním vneseného tepla do svaru. To je také důvod, proč by se neměl používat předehřev a měla by být předepsána teplota interpass [4]. Při určitém obsahu nečistot, především síry a fosforu, a poměru austenitotvorných a feritotvorných prvků mohou vznikat při svařování horké trhliny. Aby se zabránilo vzniku těchto trhlin, je potřeba zvolit materiály s vhodným obsahem chemických prvků [11]. Austenitické oceli se svařují s přídavným materiálem podobného chemického složení nebo s výše legovaným [3].

Feritické oceli mají obsah chromu v rozmezí 12-30 % a méně než 0,1 % uhlíku. V porovnání s austenitickými oceli nejsou tak dobře svařitelné. V teplotně ovlivněné oblasti dochází k zhrubnutí zrn a tím dochází ke zkřehnutí a možnému vzniku studených trhlin. Proto se limituje vnesené teplo, předepisuje se hodnota interpass a je doporučován předehřev okolo 200 °C. Svařence se často žíhají v rozmezí teplot 750-850 °C pro dosažení lepších mechanických vlastností. Používají se přídavné materiály s podobným složením jako má základní materiál nebo austenitické dráty [3].

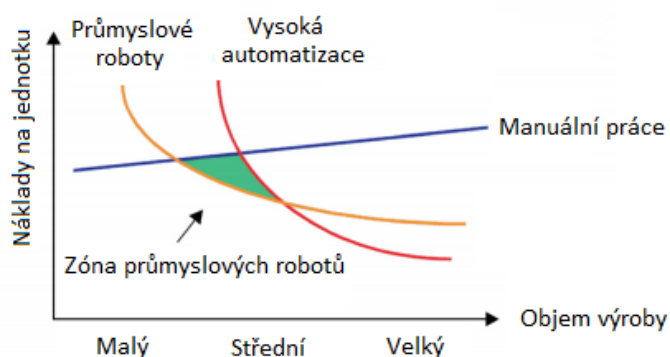
Martenzitické oceli mají obsah 12-18 % chromu a 0,1-0,3 % uhlíku. Všeobecně lze říct, že martenzitické oceli jsou špatně svařitelné. Důvodem je vznik tvrdé a křehké oblasti v základním materiálu blízko linie tavení. Použitím předehřevu lze tvrdost snížit. Teplota předehřevu se pohybuje v rozmezí 200-400 °C v závislosti na typu konstrukce a její tloušťky. Po svařování se svařenec musí tepelně zpracovávat při teplotě 650-750 °C po dobu 30-60 minut. Bez těchto opatření hrozí vznik studených trhlin v křehké oblasti. Používají se martenzitické nebo austenitické přídavné materiály [3].

Duplexní oceli obsahují až 29 % chromu, 5-8 % niklu, 1-4 % molybdenu, méně než 0,03 % uhlíku a až 0,4 % dusíku. Jsou dobře svařitelné a lze je svařovat všemi známými metodami. Předehřev většinou není nutný. Při svařování těchto materiálů se musí kontrolovat vnesené teplo a dodržovat teplota interpass. Příliš vysoké vnesené teplo vede k precipitaci nevhodných fází. Při malém vneseném teple vznikají nitridy chromu. V obou případech to má negativní vliv na mechanické a korozní vlastnosti. Pro svařování se používá přídavný materiál o podobném chemickém složení s větší koncentrací niklu [3].

Při výrobě ocelových konstrukcí je často potřeba svařovat korozivzdorné oceli s uhlíkovými nebo nízkolegovanými oceli. Kromě toho je potřeba svařovat i různé korozivzdorné oceli navzájem mezi sebou [3]. Heterogenní spoje představují problém při jejich zhotovování kvůli rozdílům v chemickém složení, fyzikálních a mechanických vlastnostech ocelí [11]. Je tak potřeba věnovat zvláštní pozornost metalurgii svarového kovu [3]. U metod tavného svařování jako jsou 11, 12, 13, a 14 musí být brán v potaz přídavný materiál, který musí být kompatibilní pro obě svařované oceli. Svařované oceli mohou mít také různé požadavky na předehřev a tepelné zpracování. Neméně důležitá je také volba vhodné technologie svařování pro daný heterogenní spoj. Zhotovení svarového spoje představuje určitou výzvu ve výrobě a při jeho zhotovování je třeba často dělat kompromisy [11].

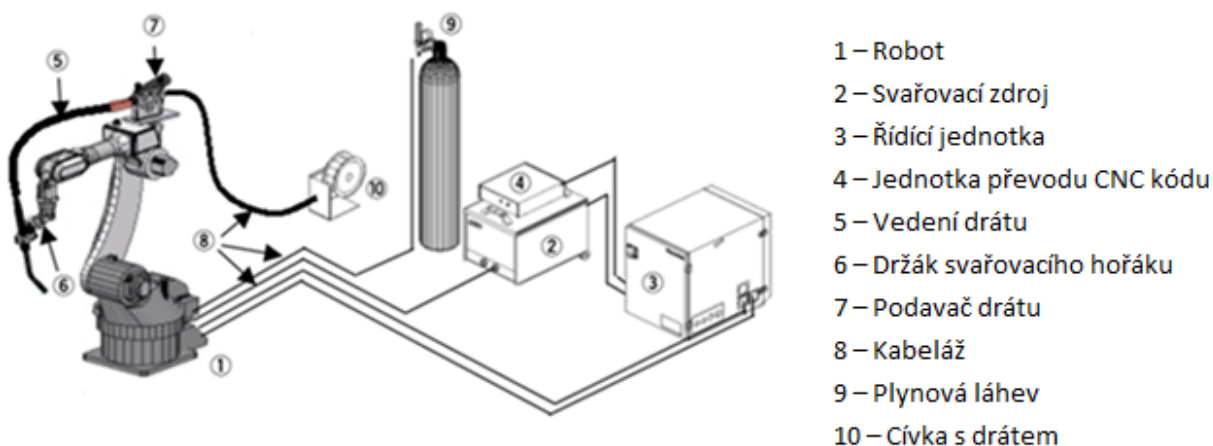
3 ROBOTIZACE SVAŘOVÁNÍ

Mechanizace svařování může být v mnoha úrovních, od nejjednodušších po vysoce sofistikované. Nejvyšší úroveň mechanizace je využití průmyslových robotů [12]. Ty se postupem času začaly využívat čím dál více a staly se ve výrobě nepostradatelnými. Pozadu nezůstalo ani svařování, které průmyslové roboty začalo hojně využívat a v dnešní době se až 40 % průmyslových robotů využívá pro svařovací operace. Hlavním důvodem používání průmyslových robotů je, že odolávají negativním vlivům prostředí jako jsou teplo, výpary a záření. Zároveň požadavky trhu a velká konkurence nutí výrobce tlačit cenu co nejnižší a hledat neoptimálnější výrobní postupy. Jak lze vidět na obrázku 3.1, průmyslové roboty jsou vhodné pro malé až střední objemy výroby ve srovnání s manuální prací nebo vysokou automatizací. Kromě nižších nákladů na výrobu a ochrany zdraví pracovníku nabízí průmyslové roboty větší produktivitu, kvalitu a flexibilitu [13].



Obrázek 3.1 – Vhodnost využití průmyslových robotů podle objemu výroby [13]

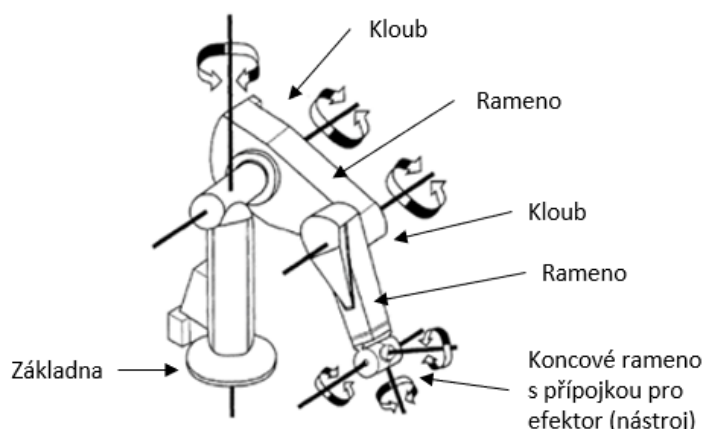
Termín robot lze definovat jako automaticky ovládaný přeprogramovatelný víceúčelový manipulátor pro činnost minimálně ve třech osách a je statický nebo mobilní. Svařovací roboty obsahují mnoho druhů víceosých manipulátorů, které jsou ovládané pohonem. Jsou vybaveny senzory a softwarem, pomocí kterých lze provádět složité a nepřetržité svařovací procesy. Svařovací robot lze vidět na obrázku 3.2. Kromě uvedeného vybavení na obrázku může obsahovat i polohovací stoly a zařízení pro čištění svařovací hubice [12].



Obrázek 3.2 – Svařovací robot s vybavením [14]

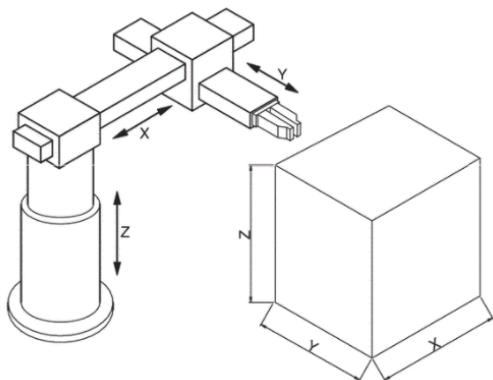
3.1 Mechanická část

Mechanická část robota označuje základnu a kinematický řetěz, který se skládá z manipulačních ramen a kloubů. Na koncovém bodě kinematického řetězce je nástavec pro umístění efektoru (nástroje). Efektor je zařízení, které vykonává požadovanou operaci. V případě svařování to je hořák. Mechanická část určuje stupeň volnosti robota. Stupeň volnosti robota je počet nezávislých pohybů, které může provádět s ohledem na svoji základnu. Pohyby mohou být posuvné, otočné, sférické nebo spirálovité. Roboti mají obvykle 5 nebo 6 stupňů volnosti. 3 stupně volnosti umožňují umístění efektoru ve 3D prostoru, další stupně volnosti slouží k jeho samotné orientaci. Robot se šesti stupni volnosti lze vidět na obrázku 3.3. Pro některé aplikace lze využít i více os, například pohyb základny v určitém směru [15].



Obrázek 3.3 – Popis robotu se šesti stupni volnosti [15]

Konstrukce robotů a jejich pracovní prostor je dán jejich kinematickou strukturou. Podle toho lze roboty dělit na určité typy. Prvním typem kinematické struktury je kartézská (portálová), která se skládá ze 3 na sebe kolmých posuvných os a její pracovní prostor je tak krychle nebo kvádr [15]. Tato kinematická struktura byla vyvinuta především pro obloukové svařování, ale našla uplatnění i pro přemísťování objektů a montážní operace. Struktura je lehce programovatelná, dosahuje velké přesnosti, opakovatelnosti a je vhodná pro operace s velkým pracovním prostorem. Není však flexibilní a je náročná na údržbu. Na obrázku 3.4 lze vidět schéma kartézské struktury s jejím pracovním prostorem a na obrázku 3.5 využití této struktury pro svařování v lodním průmyslu [16].

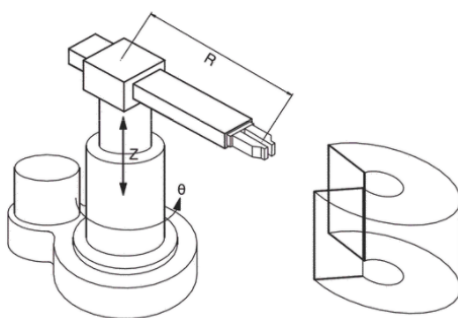


Obrázek 3.4 – Kartézská kinematická struktura [16]



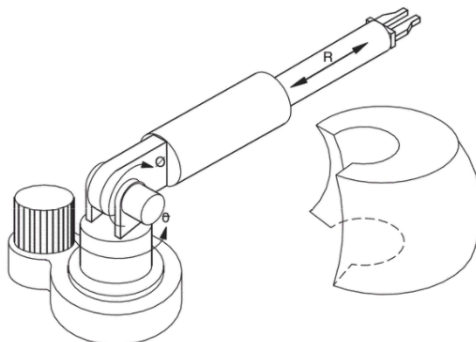
Obrázek 3.5 – Svařování v lodním průmyslu [12]

Druhým typem je válcová kinematická struktura. Tento typ struktury se skládá z vodorovného ramene, které je připevněno na sloupu. Sloup je umístěný na otočné základně a robot se tak může s ramenem otáčet kolem sebe. Další dva pohyby jsou zdvih ramene a jeho pohyb vpřed a vzad. Vzniká pracovní prostor, který je tvořen částí válce [15]. Rychlost polohování je větší, robot je lehce programovatelný a lze pracovat i s těžkými předměty. Tuhost je menší než u předchozí struktury a sníží se tím přesnost [16]. Konstrukce lze využít pro odporové bodové svařování, montáž nebo pro určité operace lití a kování. Na obrázku 3.6 je vidět schéma válcové struktury a její pracovní prostor [15].



Obrázek 3.6 – Válcová kinematická struktura [16]

Dalším typem je sférická kinematická struktura, jejímž pracovním prostorem je část kulové plochy, jak lze vidět na obrázku 3.7. Roboty této kinematické struktury se skládají z otáčející se základny, otočného čepu a teleskopického ramene. Pracuje podle sférických souřadnic a nabízí tak větší flexibilitu. Přesnost, která se mění s délkou ramene, je horší a robot je celkově hůře programovatelný. Uplatnění této struktury je podobné jako u struktury válcové [15].



Obrázek 3.7 – Sférická kinematická struktura [15]

Posledním typem je kloubová kinematická struktura. Tato kinematická struktura se skládá ze 3 konstantních článků, které jsou spojeny klouby a jsou umístěny na rotující základně. Vzniklý pracovní prostor robotu je nepravidelný kulového tvaru. Struktura připomíná lidskou ruku a nabízí tak vysokou flexibilitu. Proto je tento typ kinematické struktury nejoblíbenější ve strojírenském průmyslu, především pak v tom automobilovém, kde se využívá pro svařování, montáž, aplikování nástřiku a další [16]. Vysoká flexibilita má však svoji cenu. Nepřesnosti kloubů na konci ramene robota se sčítají a přesnost robota může být relativně malá. Další nevýhodou je složité programování a řízení robota. Tato kinematická struktura lze vidět na obrázku 3.3 [15].

3.2 Pohon

Pohon je zařízení pro přeměnu energie, jehož funkcí je pohánění mechanické části robotu [15]. Výrazně ovlivňují kvalitu průmyslových robotů a jsou na ně tak kladeny určité požadavky: plynulý rozběh a brždění, vysoká přesnost polohování, dostatečná polohová tuhost, minimální hmotnost, minimální moment setrvačnosti, vysoký měrný výkon a minimální rozměry. Kromě těchto všeobecných požadavků existují i další v závislosti na aplikaci robotu. Průmyslové roboty lze klasifikovat podle druhu energie, která se mění na mechanickou. Dělí se na elektrické, hydraulické a pneumatické [17].

Elektricky poháněné roboty využívají přeměnu elektrické energie na mechanickou a v dnešní době mají největší zastoupení v průmyslu, zejména u těch střední velikosti. Lze je přesně ovládat a mohou se pohybovat po komplikovaných drahách, proto jsou preferované pro přesné aplikace [16]. Hlavní výhodou je snadno dostupný zdroj energie, jednoduchá údržba, čistota provozu a nízké pořizovací náklady. Používají se prakticky všechny typy základních elektrických motorů – krokové, stejnosměrné, střídavé. Trh je nabízí ve velkém rozsahu výkonu a rychlostí [17].

Hydraulický pohon využívá k přeměně sil, na mechanický pohyb, vysokotlakou kapalinu. Hydraulické válce a motory nabízejí vysokou úroveň síly a výkon spolu s přesným ovládáním a plynulým chodem. Jsou preferované pro roboty s velkou nosností a tam, kde při využití elektricky poháněných robotů hrozí vznik požáru, například lakování [15]. Přestože jejich využití klesá, stále jsou využívány v automobilovém průmyslu, kde mnoho robotů pro bodové svařování využívá tento typ pohonu [16]. Nevýhodou je potřeba dalších zařízení jako jsou čerpadla, hadice a další [17].

Většina firem má ve svých podnicích potrubí se stlačeným vzduchem, proto je pneumatický pohon často nejlevnější a nejpraktičtější možností. Tyto pohony jsou jednoduché, spolehlivé a mají snadnou údržbu. Nejčastěji se používají pro jednoduchou manipulaci s objekty nižší hmotnosti [15].

3.3 Senzory

Aby robot byl užitečný, potřebuje informace o svém stavu a co se děje v prostředí kolem něj. K tomu slouží senzory, které sbírají tyto potřebné informace. Informace jsou poté poskytovány řídicí jednotce a robot se může přizpůsobit aktuální situaci nebo data zachovat pro pozdější analýzu. Bez těchto senzorů poskytující zpětnou vazbu by byl robot jenom stroj. Senzory fungují tak, že měří určitou veličinu (sílu, světlo, zvuk atd.), kterou následně změní na elektrický signál (změna velikosti proudu, napětí, odporu). Senzory nezahrnují jenom snímače pro fyzické veličiny, ale také zařízení pro vstup dat jako je například klávesnice pro textovou informaci. Senzory lze dělit na:

- vnější – pomocí těchto senzorů robot vnímá a komunikuje s prostředím,
- vnitřní – tyto senzory měří kinematické a dynamické parametry robota [15].

Dále lze senzory dělit podle druhu získávaných informací:

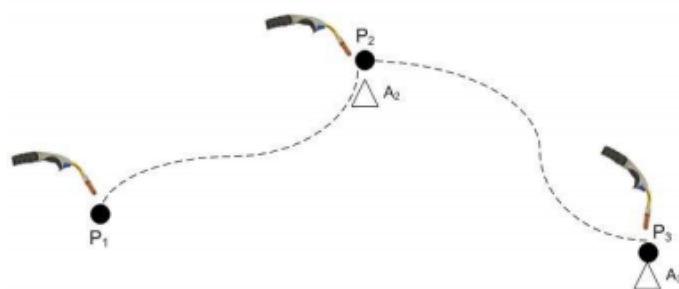
- dotykové,
- silové/momentové,
- optické,
- fotoelektrické,
- akustické,
- magnetické,
- ultrazvukové,
- vizuální [15].

3.4 Řízení robota

Pohyb je řízený kombinací softwaru a hardwaru, které jsou programovány uživatelem. Roboty lze rozlišovat podle toho, jestli k řízení používají servomotor nebo nepoužívají. Robot řízený bez servomotoru využívá čistě mechanického systému se spínači, které zastavují pohyb a jsou přeprogramovány pro konkrétní opakující se pohyby. Řízení je přesné a jednoduché. Tento typ řízení není však vhodný pro svařovací roboty. Pro svařovací roboty je vhodnější využívat systém se servomotory, který je schopen řídit rychlost, zrychlení a dráhu pohybu od začátku do konce. Využívají se k tomu programovatelné logické automaty (PLC) a senzory. Lze tak sledovat polohu každé osy mechanické části. Řízení robota se servomotorem se dělí na: bodové (PTP – point to point), kontinuální (CP – continuous-path), dráhové (controlled-path) [15].

3.4.1 Bodové řízení

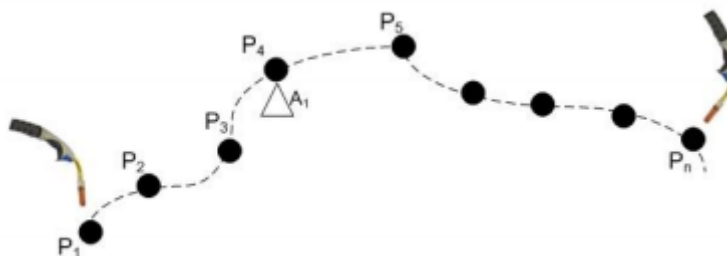
U tohoto typu řízení se robot pohybuje z jednoho bodu do druhého v rámci svého pracovního prostoru. Pozice bodů je číselně definována a robot zvolí nejlepší dráhu mezi nimi (viz obrázek 3.8). Poté, co se robot přesune do požadované polohy, zastaví se a koncový efektor provede zadaný úkol. Po dokončení úkolu se robot přesune do dalšího bodu a cyklus se může opakovat. Tento typ řízení je vhodný v případech, kdy je potřeba velké opakovatelnosti. Je typický pro bodové svařování, kdy se robot pohybuje do místa svaru, zastaví se a poté začne proces svařování. Postup se opakuje, dokud nejsou svařené všechny body [15].



Obrázek 3.8 – bodové řízení robota; P_i – poloha svařovacího hořáku, A_i – činnost robota [18]

3.4.2 Kontinuální řízení

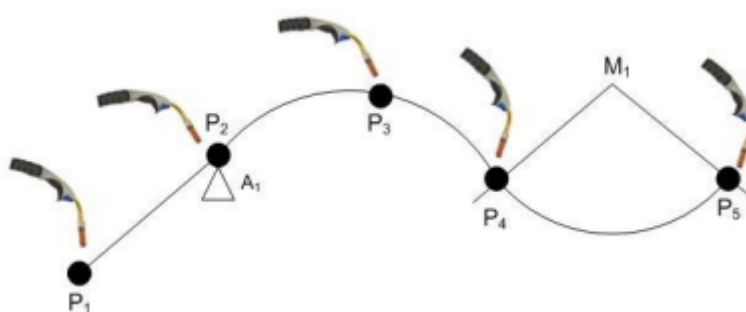
U kontinuálně řízeného robotu provádí nástroj úkol během toho, co je robot v pohybu. Dráha robotu je určena velkým počtem bodů v těsné blízkosti, které má robot uložené v paměti (viz obrázek 3.9). Všechny osy robotu se pohybují současně, každá s jinou rychlostí podle počítače. Počítač koordinuje rychlosti, aby se robot pohyboval přesně po předem nadefinované dráze [15]. Tento typ řízení je vhodný pro aplikace, kde je potřeba pohyb po specifické dráze, například pro obloukové svařování. Programování je však náročné a může být zdolouhavé [16].



Obrázek 3.9 – kontinuální řízení; P_i – poloha svařovacího hořáku, A_i – činnost robota [18]

3.4.3 Dráhové řízení

Dráhově řízené roboty se pohybují po předem počítačem generované dráze z jednoho bodu do druhého. V paměti robota musí být předem nadefinovány počáteční a koncový bod a na rozdíl od bodového řízení také funkce podle níž se určuje dráha. Dráha může být přímka, kde se koncový efektor natočí podle potřeby nebo může obsahovat i různé křivky. Robot si dále sám zvolí mezihodnoty na dráze, kterými musí projít (viz obrázek 3.10). Stejně jako u kontinuálního řízení, je tato metoda vhodná pro obloukové svařování [15].



Obrázek 3.10 - Dráhové řízení; P_i – poloha svařovacího hořáku, A_i – činnost robota [18]

3.5 Doporučení při využití svařovacích robotů

Při svařování průmyslovými roboty je potřeba vzít v úvahu určitá doporučení z konstrukčního hlediska. Je potřeba, aby návrh svarového spoje a jeho umístění zaručovali možnou opakovatelnost a kvalitu. Dobře navrhnutým svarovým spojem se dosáhne i úspory přídavného materiálu. Vzhledem k tomu, že mechanické vlastnosti svarů zhotovených pomocí robotů se mohou lišit od těch zhotovených ručně, je nutné svary podrobit adekvátnímu zkoušení použitím stejného zařízení, které bude využito ve výrobě. Při využití robotického svařování je potřeba [12]:

- zajistit přístup svařovacímu hořáku ke svarovému spoji,
- preferovat koutové svary před rohovými,
- využívat především svařovací polohy PA a PB,
- změnit geometrii svarových ploch, pokud se nedosahuje požadovaného výsledku,
- používat polohovací prvky pro svařované součásti,
- dělit výrobky do podsestav a tím zjednodušit svařování,
- upínat svařované díly co nejblíže svarovému spoji,
- používat automatizované upínání tam, kde je vhodné,
- upínat a umísťovat svařované díly opakovatelným způsobem,
- používat upínací přípravky, které zohledňují deformace způsobené teplotními cykly,
- limitovat použití stehování a při jeho použití snažit o jejich nejmenší množství [12].

Výrobní tolerance svarů jsou velice důležité pro dosažení vysoké kvality při robotickém svařování. Je důležité brát v potaz vznik určitých nepřesností a případně i náklady na jejich nápravu. Všeobecně jsou v průmyslu přijatelné tyto tolerance svarových spojů [12]:

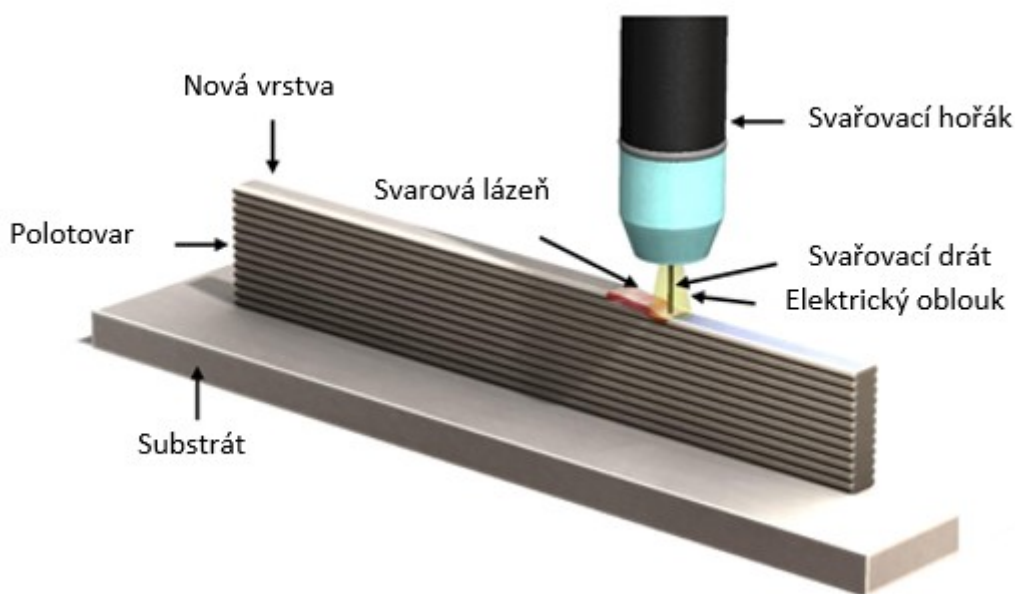
- $\pm 1/2$ průměru elektrody pro svařování 131 (MIG) a 135 (MAG),
- $\pm 1/2$ průměru elektrody pro svařování 141 (TIG),
- $\pm 1/2$ průměru paprsku pro laserové svařování (52) [12].

4 WIRE ARC ADDITIVE MANUFACTURING – WAAM

V posledních letech umožnily metody přímého energetického nanášení (DED – Directed Energy Deposition) efektivní aditivní výrobu větších kovových dílů. Přestože je potřeba vytvořený výrobek dále obrábět, v porovnání s dalšími aditivními technologiemi jako je třeba spékání práškové vrstvy, dosahují metody DED kratších výrobních časů. Jako výrobní materiál se používá drát. To eliminuje potřebu recyklace prášku, snižuje zdravotní a bezpečnostní riziko a výrazně snižuje cenu materiálu. Zároveň dochází k velké úspoře materiálu v porovnání s konvenčními metodami obrábění. Nevýžadují specifické nástroje jako při kování či odlévání a pro malé objemy výroby můžou tak být výhodnější. Zdroje energie u metod DED jsou elektrický oblouk, elektronový paprsek nebo laser [19].

Technologie WAAM (wire arc additive manufacturing) je jednou z metod DED, která jako zdroj energie pro natavení drátu používá elektrický oblouk. Použití elektrického oblouku disponuje určitými výhodami jako jsou nižší investiční náklady, vyšší produktivita a možnost využití známých metod a zařízení pro svařování [19]. Technologie je automatizovaná a využívá svařovacích robotů. Je vhodná pro výrobu větších součástí středně složitého tvaru a lze pomocí ní zkrátit čas výroby až o 60%. Její uplatnění lze nalézt v kosmickém, leteckém, biomedicínském a automobilovém průmyslu [20].

Princip technologie WAAM lze vidět na obrázku 4.1. Robot postupně navažuje na podložku (substrát) svarové housenky v předem naprogramované 2D dráze. Vytváří se tak vrstva. Poté se svařovací hořák posune o tloušťku vrstvy výš a pokračuje navařováním další vrstvy na dříve navařenou. Tento proces se opakuje do té doby, dokud není součást hotová. Po dokončení procesu je možné platformu odstranit nebo ji navrhnout tak, aby byla součástí výrobku [21].

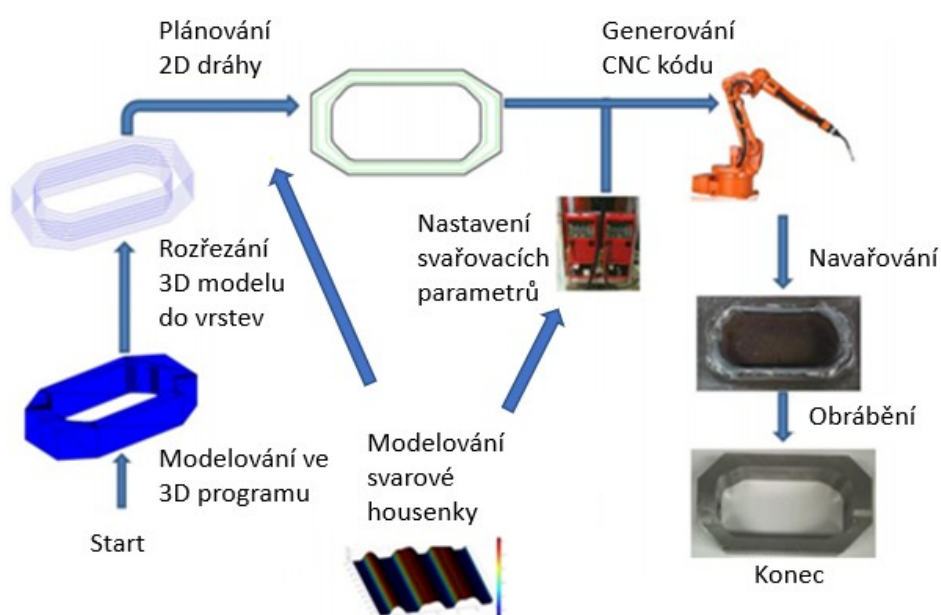


Obrázek 4.1 – Princip WAAM [22]

Pro WAAM lze použít tři svařovací metody: 151 (plazmové svařování), 141 (TIG) a 131/135 (MIG/MAG). Každá svařovací metoda má své uplatnění. U navařování pomocí 141 dosáhneme nejmenšího výkonu odtavování, který se pohybuje v rozmezí 1-2 kg/h. U metody 151 díky větší energii oblouku, lze dosáhnout většího výkonu odtavování v rozsahu 2-4 kg/h. U obou metod je oblouk relativně stabilní s malým rozstřikem [20]. Pro dosažení kvalitních návaru je potřeba zajistit, aby přídavný materiál měl konstantní rychlost podávání. U těchto dvou metod se využívá netavící se elektrody a přídavný materiál se přivádí externě. Nevýhodou je, že generování dráhy nástroje a programování robota může být komplikované [21]. Nejvyššího výkonu odtavování se dosáhne při použití metod 131 nebo 135. Lze docílit výkonu až 8 kg/h. Oblouk je méně stabilní, a protože elektrický oblouk reaguje přímo s přídavným materiálem, vzniká velký rozstřik, který lze eliminovat použitím různých metod, např. CMT. Při použití metody CMT dojde taky ke snížení množství vneseného tepla [20]. Pro navařování ocelí a hliníkových slitin je vhodnější použít metodu 131 nebo 135. Pro navařování titanu pak metody 141 nebo 151 [21].

4.1 Postup výroby technologií WAAM

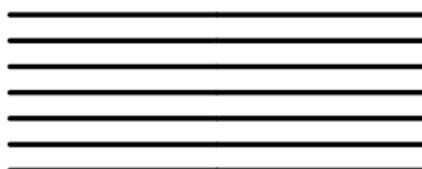
Výroba dílu pomocí technologie WAAM obsahuje několik kroků. Tyto kroky jsou zobrazeny na obrázku 4.2. Prvním krokem je vytvoření 3D modelu vyráběné součásti v jakémkoliv CAD programu. Tento model se následně vloží do softwaru, který je určený pro aditivní výrobu. Software 3D model rozdělí do vrstev o určité předem definované tloušťce. Poté software automaticky generuje 2D dráhu pro každou vrstvu a geometrii svarové housenky [21]. Dráha nanášení vrstev i svařovací parametry lze v případě potřeby optimalizovat. Tyto údaje jsou převedeny do CNC kódu pro robota a může začít proces navařování [23]. Pokročilejší systémy WAAM mohou být vybaveny různými senzory, které kontrolují geometrii svarových housenek, teplotu interpass atd. Po dokončení navařování lze v případě potřeby díl obrábět a tepelně zpracovávat [20].



Obrázek 4.2 – Postup výroby součástí technologií WAAM [23]

4.2 Metody nanášení vrstev

Určení vhodné strategie nanášení vrstev je jedním z klíčových úkolů technologie WAAM, protože má vliv na užité vlastnosti vyráběné součásti. Pro aditivní technologie bylo již vyvinuto několik metod. První metodou nanášení vrstev je rastrová metoda (viz obrázek 4.3). Tato metoda je založena na navařování svarových housenek v jednom směru vedle sebe. Robot se tak bude muset často vracet, což vede k dlouhým výrobním časům. Navíc vyrobený díl bude mít anizotropní problémy. Přesnost obrysu je malá na jakékoliv hraně, která není rovnoběžná ve směru pohybu navařování [24].



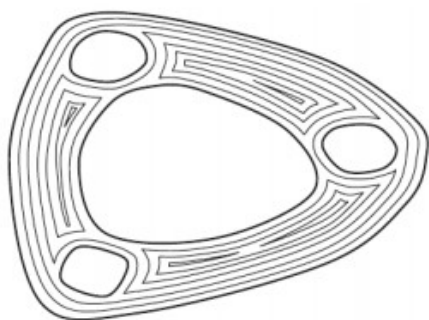
Obrázek 4.3 – Rastrová metoda [24]

Nejvyužívanější metodou v komerční výrobě je metoda „zigzag“ (viz obrázek 4.4). Stejně jako u rastrové metody se housenky navařují řádek po řádku a přetrvávají tak problémy s anizotropií a přesností obrysu. Rovnoběžné svarové housenky jsou spojené v jednu kontinuální housenku a tím se odstraní zbytečný pohyb robota. To výrazně snižuje výrobní časy a zvyšuje produktivitu [23].

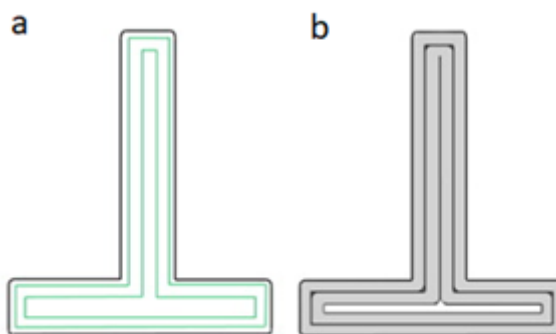


Obrázek 4.4 – Metoda zigzag [24]

Použitím obrysové metody (viz obrázek 4.5) se odstraní problémy s přesností geometrie. U této metody se generuje mnoho uzavřených křivek, které sledují obrys od vnějšku směrem ke středu vrstvy [23]. V určitých případech můžou ve středu vrstvy vznikat mezery. Příklad lze vidět na obrázku 4.6, kde po vygenerování dráhy (a) a následném návaru (b) vzniká mezera [24]. Směr navařování se neustále mění a nebude vznikat problém s anizotropií [23].



Obrázek 4.5 – Obrysová metoda [24]



Obrázek 4.6 – (a) obrys dráhy, (b) vrstva návaru [24]

Kontinuální nanášení vrstev (viz obrázek 4.7) patří mezi další metody. Pomocí této metody se generují vyplňovací vzory, které v jedné cestě vyplní libovolné tvarové oblasti. Navařování vrstvy je plynulé a vysoce produktivní [23]. K generaci lze použít velké množství algoritmů. Je potřeba brát v úvahu, aby cesty nebyly příliš komplikované a nedocházelo v určitých oblastech velké kumulaci tepla [25].



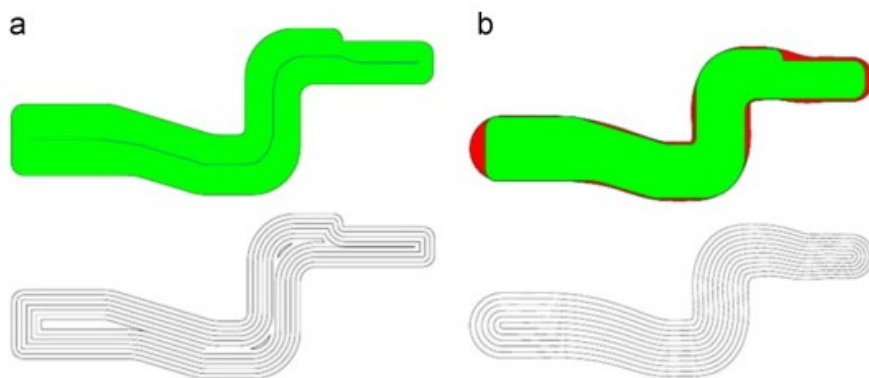
Obrázek 4.7 – Kontinuální metoda [24]

Hybridní metoda nanášení (viz obrázek 4.8) kombinuje výhody předchozích metod. Příklad lze vidět na obrázku 4.8, kde se kombinuje metoda „zigzag“, obrysová a kontinuální. Pro zlepšení geometrických vlastností obrysu se pro tuto část použije metoda obrysová. Obrys se poté vyplní pomocí metody „zigzag“ v jedné nanášecí cestě. Dosáhne se tak i vysoké produktivity [23].



Obrázek 4.8 – Hybridní metoda [25]

Poslední metodou nanášení vrstev je metoda MAT (Medial Axis Transformation) . U této metody se křivky generují od středu směrem ven. Výsledkem jsou vrstvy bez mezer a dutin, při dosažení vysoké produktivity. Toho se docílí ukládáním přebytečného materiálu na hranicích, jak je znázorněno na obrázku 4.9 (červená oblast). Ten lze odstranit následným opracováním [24].



Obrázek 4.9 – (a) použití obrysové metody, (b) použití metoda MAT [24]

4.3 Problémy při výrobě technologií WAAM

Díly vyrobené technologií WAAM mají v mnoha případech srovnatelné mechanické vlastnosti s díly vyrobenými konvenčními metodami. Toho lze dosáhnout za předpokladu, že díl vyrobený technologií WAAM nebude obsahovat žádné vady, které by měly negativní vliv. Mezi nejčastější problémy patří zbytkové napětí, deformace, pórovitost, trhliny a delaminace. K těm dochází kvůli různým příčinám jako je například nevhodná cesta nástroje, nevhodné nastavení svařovacích parametrů, tepelná deformace, kontaminace svaru a další. Každý materiál je jinak náchylný k určitým vadám. To lze vidět na následujícím obrázku 4.10 [20].



Obrázek 4.10 – Výskyt defektů v závislosti na materiálu [20]

4.3.1 Pórovitost

Pórovitost je běžnou vadou technologie WAAM, které je nutné se vyvarovat, jelikož má negativní vliv na mechanické vlastnosti. Povrch přídatného materiálu je často kontaminován vlhkostí, prachovými částicemi, mastnotami a dalšími uhlovodíky. Při navařování jsou nečistoty absorbovány do svarové lázně a po jejím ztuhnutí se tvoří pórovitost. Nejnáchylnějším materiálem k této vadě je hliník, kde i malé množství vodíku může způsobit tuto vadu. Pórovitost může vznikat i špatně zvolenou dráhou nástroje, nestabilním procesem nebo nedostatečným průtokem ochranného plynu. Ke snížení rizika vzniku pórovitosti je nutné [20]:

- použít technologii 131 nebo 135 se střídavým proudem nebo metodu CMT,
- použít plyn vysoké čistoty,
- použít co nejčistší přídatný materiál a podložku,
- vhodně tepelně zpracovat,
- změnit profilu svarové housenky optimalizováním svařovacích parametrů [20].

4.3.2 Trhliny a delaminace

Za vznik trhlin a delaminace může, jak vliv tepla během výroby, tak i vlastnosti materiálu. Trhliny se dále dají dělit na krystalizační a likvační. Krystalizační trhliny vznikají při tuhnutí svarového kovu jako důsledek vysokého napětí ve svarové lázni a zvětšené velikosti zrn. Záleží tak hlavně na tuhoucích vlastnostech materiálu. Likvační trhliny vznikají podél hranic zrn a tvoří se z důvodu rozdílu struktury. K delaminaci dochází v důsledku nedostatečného natavení vrstev. Je to defekt, při kterém se materiál rozpadá na vrstvy, které nedrží pohromadě. Tento defekt je viditelný a nedá se nijak opravit následným zpracováním. Bimetaly jako je třeba hliník – měď, hliník – titan, hliník – železo jsou k těmto defektům nejvíce náchylné. Stojí za tím velké rozdíly v jejich vlastnostech. K těmto vadám jsou náchylné i slitiny niklu. Snížit riziko vzniku trhlin a delaminace lze [21]:

- nahřátím platformy (substrát),
- zajištěním pomalého ochlazování během navařování,
- použitím smíšených drátů s optimalizovaným složením [21].

4.3.3 Zbytkové napětí a deformace

Stejně jako u ostatních aditivních technologií nelze vzniku zbytkového napětí u technologie WAAM zabránit. Problém je především u velkých nebo tenkostěnných konstrukcí. Vznik zbytkového napětí je způsoben nerovnoměrným ohřevem vyráběné součásti a následným smrštěním materiálu. Dochází ke zhoršení únavových, lomových a korozních vlastností. Pokud zbytkové napětí překročí mez kluzu, těleso na to zareaguje deformací, to lze vidět na obrázku 4.11. Při překročení meze pevnosti je třeba očekávat lom [20]. Přestože zbytková napětí lze minimalizovat následným tepelným zpracováním, ztráta geometrických tolerancí je hlavní příčinou, proč je snaha minimalizovat vznik zbytkových napětí během navařování [26]. Zbytková napětí a deformace lze redukovat:

- vhodnou volbou dráhy nástroje,
- zvolením vhodné teploty interpass,
- optimalizováním svařovacích parametrů,
- návrhem symetrické součásti [21].



Obrázek 4.11 – Deformace v důsledku zbytkového napětí

4.4 Materiály pro WAAM

Technologie WAAM využívá běžně komerčně dostupné materiály, které se používají ve svařovacím průmyslu. Existuje tak velká škála použitelných materiálů a slitin. Nejčastěji se používají přídatné materiály z oceli, hliníku, titanu a niklových slitin [21].

4.4.1 Oceli

Použití metody WAAM pro výrobu dílu z oceli je vhodné jen pro velké nebo geometricky komplexní díly. Největší uplatnění našly nerezové oceli především v chemickém a jaderném průmyslu. Úspěšně byly použity austenitické nerezové oceli X2CrNi18-9 (304), G 19 9 L (308LSi), X2CrNiMo17-12-2 (316L) a martenzitická ocel X30Cr13 (420). Všeobecně oceli s vysokým ekvivalentem uhlíku jsou náchylnější ke vzniku trhlin za studena. Příčinou může být rychlé ochlazování, účinek vodíku nebo zbytkové napětí. Tomu lze zabránit předehřevem a opětovným ohřevem nebo natavením předem navařených vrstev. Snižuje se rychlost ochlazování a zabraňuje se tvorbě křehkých struktur. Výsledkem těchto teplotních cyklů mohou být negativní efekty jako precipitace a stárnutí. V určitých případech je možné předejít trhlinám za studena optimalizováním svařovacích parametrů [27]. Ocelové díly vyrobené technologií WAAM vykazují menší problém s anizotropií. Při vhodném tepelném zpracování se lze anizotropie zbavit. Díly poté disponují podobnými vlastnostmi jako ty vyrobené konvenčními metodami [21].

4.4.2 Slitiny hliníku

Náklady na výrobu malých a jednoduchých dílů ze slitin hliníku pomocí konvenčních metod obrábění je nízká. Proto je technologie WAAM hlavně vhodná pro výrobu velkých a složitých tenkostěnných konstrukcí. Slitiny 2xxx (Al-Cu), 4xxx (Al-Si) a 5xxx (Al-Mg) lze úspěšně použít pro výrobu metodou WAAM. U slitin 6xxx (Al-Mg-Si) a 7xxx (Al-Zn) často vznikají vady a nejsou vhodné [21]. Obecně hliníkové díly vyrobené technologií WAAM mají horší mechanické vlastnosti než konvenčně vyráběné. K dosažení lepších mechanických vlastností a mikrostruktury je nutné hliníkové díly tepelně zpracovávat [20]. Dalším problémem je vznik vrstvy oxidu hlinitého na povrchu, kdy jeho částice zachycené ve svařové lázni mohou vést ke vzniku vnitřních vad. Při navařování se doporučuje použít střídavý proud, aby došlo k odstranění této vrstvy [27].

4.4.3 Slitiny niklu

Niklové slitiny jsou častým materiálem ve výrobě pomocí aditivních technologií. Důvodem jsou dobré mechanické vlastnosti i při zvýšených teplotách, odolnosti proti oxidaci nad 550°C a vysoké výrobní náklady při použití konvenčních metod. Uplatnění mají v leteckém, kosmickém a chemickém průmyslu. Úspěšně jsou využívány slitiny Inconel 718 a Inconel 625 [20]. Studie ukázaly, že pro jejich navařování lze využít metod 131, 141 a modifikace 131 – CMT. Musí však být vhodně nastavené svařovací parametry, aby se předešlo vzniku trhlin a pórů. Součásti z těchto slitin mají strukturu s velkými podlouhlými zrny obsahující Lavesovou fázi a karbidy. Přestože zrna jsou podlouhlá, není zde

výrazný problém s anizotropií. Lavesová fáze se považuje za škodlivou pro mechanické vlastnosti a její přítomnost může způsobovat křehkost. Z tohoto důvodu se doporučuje tepelné zpracování, aby se dosáhlo lepší mikrostruktury. Součásti pak dosahují stejných nebo mírně horších mechanických vlastností než lze dosáhnout konvenční výrobou [29].

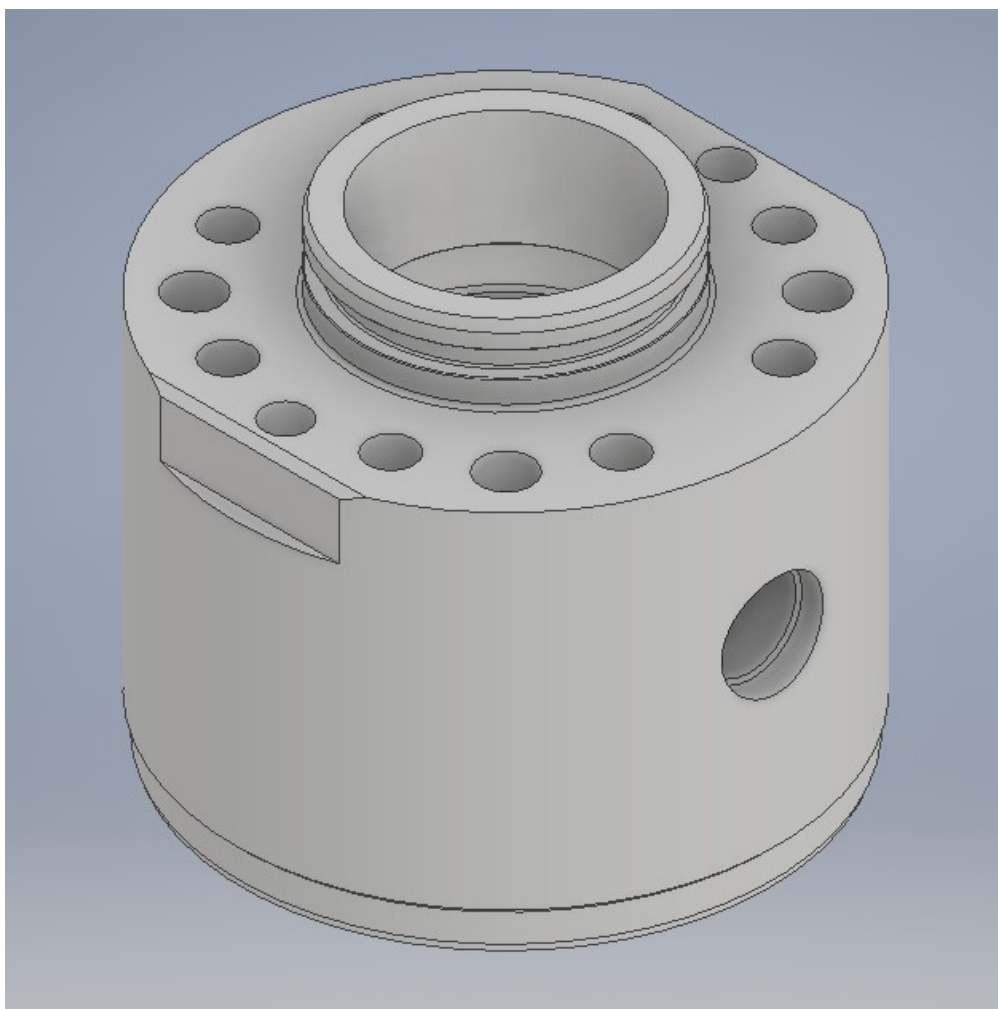
4.4.4 Slitiny titanu

Slitiny titanu mají vysokou pevnost, houževnatost, dobrou odolnost proti korozi a výrazně neztrácejí svoje mechanické vlastnosti ani při vyšších teplotách [27]. Z důvodu vysokých nákladů a špatné obrobitelnosti slitiny titanu patří mezi materiály, které jsou předmětem studií aditivních technologií jako je WAAM. Nejvíce zkoumanou slitinou titanu je Ti-6Al-4V, která má v průmyslu největší zastoupení [20]. Největší výzvou při navařování slitiny Ti-6Al-4V je problém s anizotropií mechanických vlastností. Důvodem je vznik nežádoucí mikrostruktury s velkými podlouhlými zrny, která vzniká při opakujících se teplotních cyklech navařování. Bylo provedeno několik výzkumů (přidání legur nebo aplikování tlaku po navaření každé vrstvy), aby se zabránilo vzniku této struktury [28].

5 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Experimentální část této diplomové práce se zabývá využitím robotického navařování technologií WAAM se svařovací metodou 135. Jejím cílem je výroba součásti Hrdlo, jejíž model lze vidět na obrázku 5.1. Rozměry součásti jsou uvedeny na výkrese v příloze 1. K výrobě polotovaru bylo využito robotické pracoviště VŠB-TUO na katedře 345. Následné obrábění a nedestruktivní zkoušky byly provedeny ve společnosti MSA, a.s., Dolní Benešov. Po dohodě s MSA, a.s., Dolní Benešov byl pro výrobu polotovaru součásti zvolen svařovací drát Esab OK Autrod 316LSi. Cíle této experimentální části byly:

- zvolit vhodné svařovací a geometrické parametry,
- ověřit mechanické vlastnosti navařených vrstev,
- vyrobit součást Hrdlo,
- ověřit výskyt vad.



Obrázek 5.1 – Model součásti Hrdlo

5.1 Svařovací drát – G 19 12 3 L Si

G 19 12 3 L Si (316LSi) je svařovací drát z korozivzdorné austenitické oceli. Celkově má dobrou odolnost proti korozi, zejména v kyselém a chlorovaném prostředí. Má nízký obsah uhlíku, což ho činí vhodným pro aplikace, kde hrozí riziko vzniku mezikrystalové koroze. Vyšší obsah křemíku zlepšuje svařovací vlastnosti, jako je například smáčení. Tento svařovací drát je vhodný pro chemický a potravinářský průmysl. Tento typ oceli patří mezi nejčastěji používané pro aplikace aditivních technologií. Chemické složení lze vidět v tabulce 5.1 a mechanické vlastnosti v tabulkách 5.2 a 5.3. Hodnoty vychází z atestu materiálu v příloze 2.

Tabulka 5.1 – Chemické složení svařovacího drátu G 19 12 3 L Si

C [%]	Mn [%]	Si [%]	S [%]	P [%]	Ni [%]	Cr [%]	Mo [%]	Cu [%]	N [%]
0,01	1,8	0,9	0,01	0,015	12,2	18,4	2,6	0,12	0,05

Tabulka 5.2 – Mechanické vlastnosti svařovacího drátu G 19 12 3 L Si

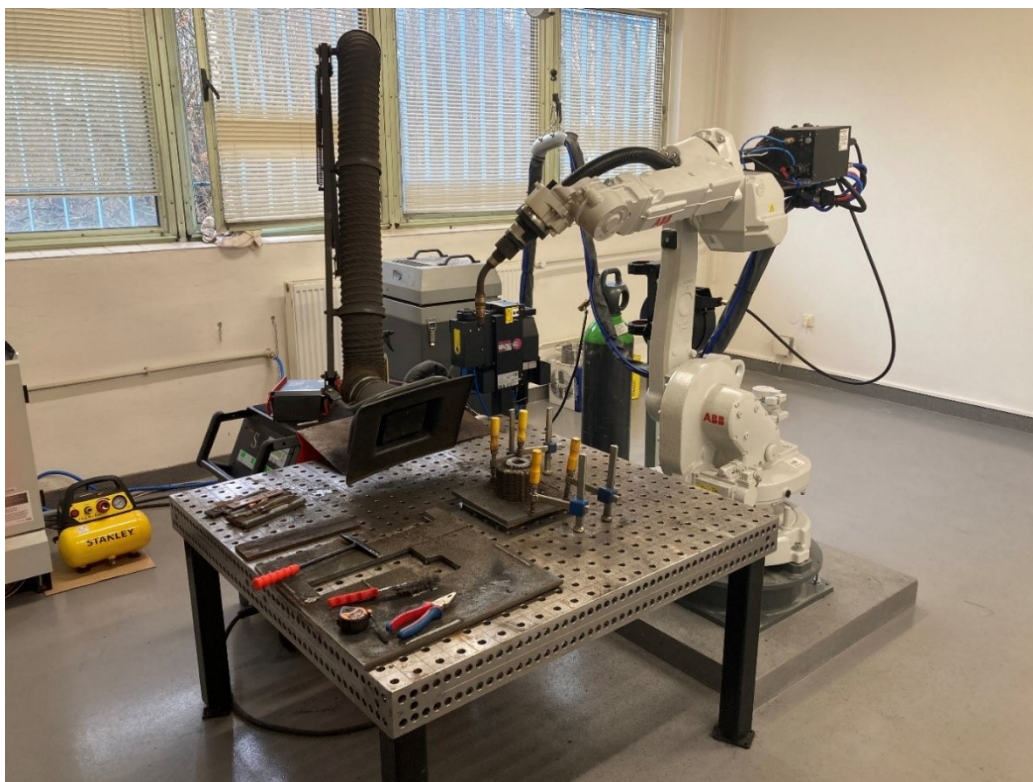
Mez pevnosti $R_{p0.2}$ [Mpa]	450
Mez kluzu R_m [Mpa]	600
Tažnost A_4-A_5 [%]	35

Tabulka 5.3 – Vrubová houževnatost svařovacího drátu G 19 12 3 L Si

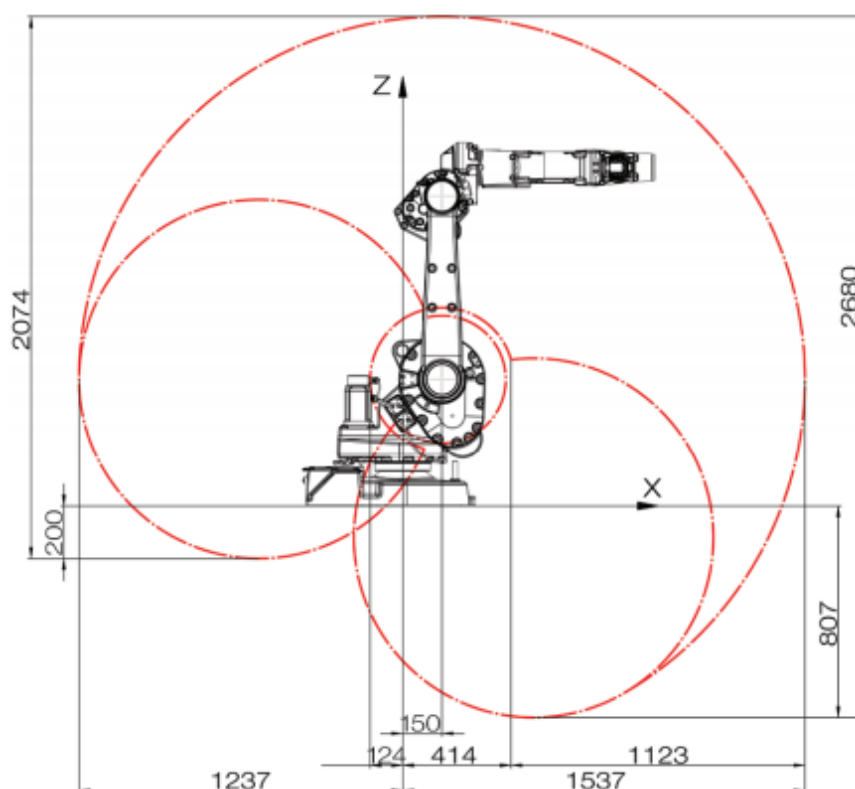
Testovací teplota [°C]	Vrubová houževnatost [J]
-196	45
-110	70
-60	95
20	120

5.2 Robotizované pracoviště

Pro navařování bylo používáno robotické pracoviště v prostorách VŠB-TUO, viz obrázek 5.2. Hlavní částí tohoto pracoviště je robot IRB 1660ID vyráběný firmou ABB, který je vhodný pro aplikace obloukového svařování. Robot má kloubovou strukturu s šesti stupni volnosti a je schopný být v pracovním režimu 24 hodin denně, 7 dní v týdnu i v náročném prostředí. Robot je charakteristický vysokou rychlostí, zrychlením a přesností. Další technické parametry ohledně robotu lze nalézt v tabulce 5.4. Jeho rozsah lze pak vidět na obrázku 5.3. Dalším důležitým vybavením je svařovací zdroj S5 RoboMIG XT od firmy Lorch. Ten je zobrazen na obrázku 5.4 a jeho technické parametry jsou uvedeny v tabulce 5.5. Mezi další vybavení pracoviště patří svařovací hořák, podavač drátu, řídící jednotka IRC5, plynové láhve, svařovací stůl s přípravky pro upnutí substrátu, cívka s drátem, odsávání a zařízení pro čištění hubice svařovacího hořáku. Vše je umístěno v jedné místnosti, kde není během procesu svařování přístup. Vše je ovládáno pomocí Flexpendantu.



Obrázek 5.2 – robotické pracoviště v prostorách VŠB-TUO



Obrázek 5.3 – Pracovní rozsah IRB 1660ID

Tabulka 5.4 – Technické parametry IRB 1660ID

Velikost základny	484 x 648 mm	Opakovatelnost dráhy	0,05 mm
Výška robotu	1392 mm	Opakovatelnost polohy	0,02 mm
Váha robotu	257 kg	Hluk	<70 dB
Počet stupňů volnosti	6	Doporučená okolní teplota pro mechanickou část během pracovního režimu	5-45 °C
Dosah	1,55 m		
Nosnost	6 kg		
Ochrana	IP 67		

Tabulka 5.5 – Technické parametry S5 RoboMIG XT

Metoda	MIG/MAG
Napájení	3 x 400V
Rozměry	845 x 445 x 810 mm
Hmotnost	87,3 kg
Rozsah svařovacího proudu	25–500 A
Nastavení napětí	nekonečná proměnná
Použitelný průměr elektrod z oceli	0,8 - 1,6 mm
Použitelný průměr elektrod z hliníku	1,0 - 1,6 mm



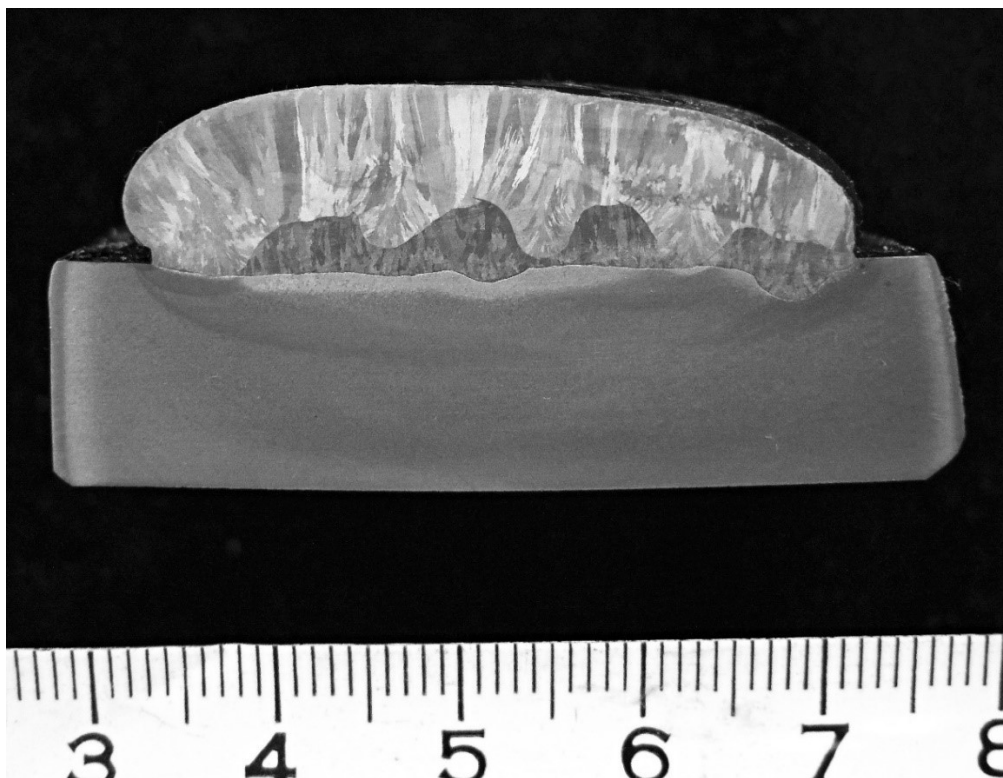
Obrázek 5.4 – Svařovací zdroj S5 RoboMIG XT

5.3 Stanovení svařovacích parametrů

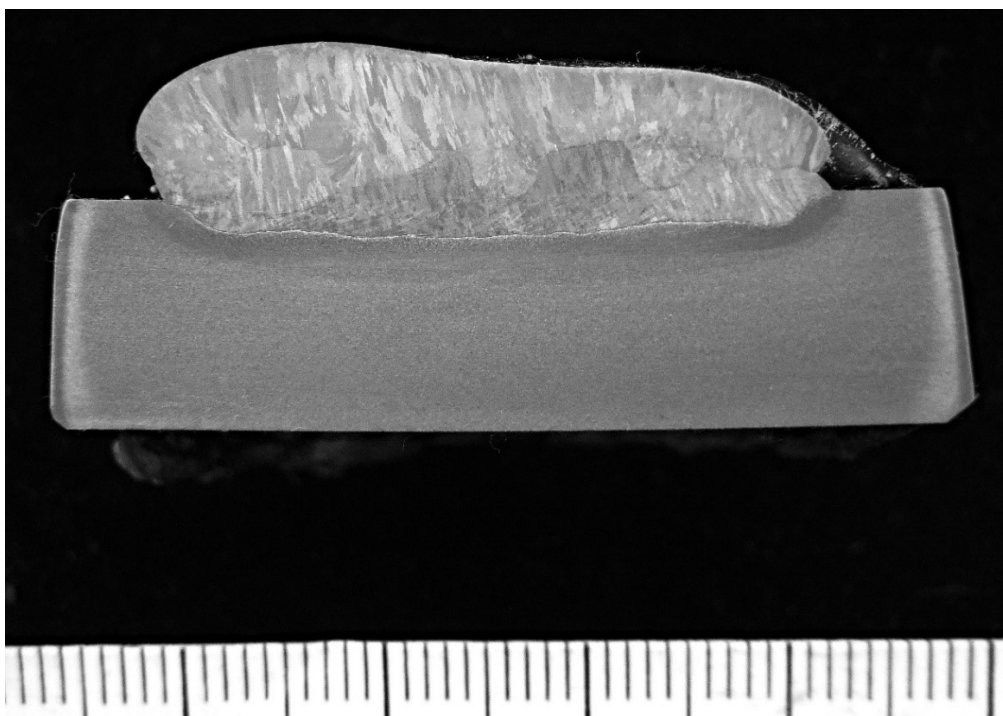
Pro stanovení vhodných svařovacích parametrů, byly navrženy 3 skupiny návarů. Jejich svařovací parametry byly zvoleny na základě předem získaných zkušeností a lze je vidět v tabulce 5.6. Byly měněny parametry svařovacího proudu, napětí a korekce napětí, zbytek proměnných byl konstantní. Na vyhodnocení nejvhodnějších parametrů mělo vliv vnesené teplo a geometrie svaru – hlavně průvar mezi vrstvy. Velké vnesené teplo způsobuje větší deformace obzvlášť u austenitických ocelí, u kterých je snaha ho limitovat. Proto byl preferovaný zkratový přenos před sprchovým, jež se vyznačuje vyšším přenosem tepla. Po zhotovení návaru byly vzorky rozřezány a nafoceny pro kontrolu makrostruktury. Lze je vidět na následujících obrázcích 5.5, 5.6 a 5.7.

Tabulka 5.6 – Svařovací parametry

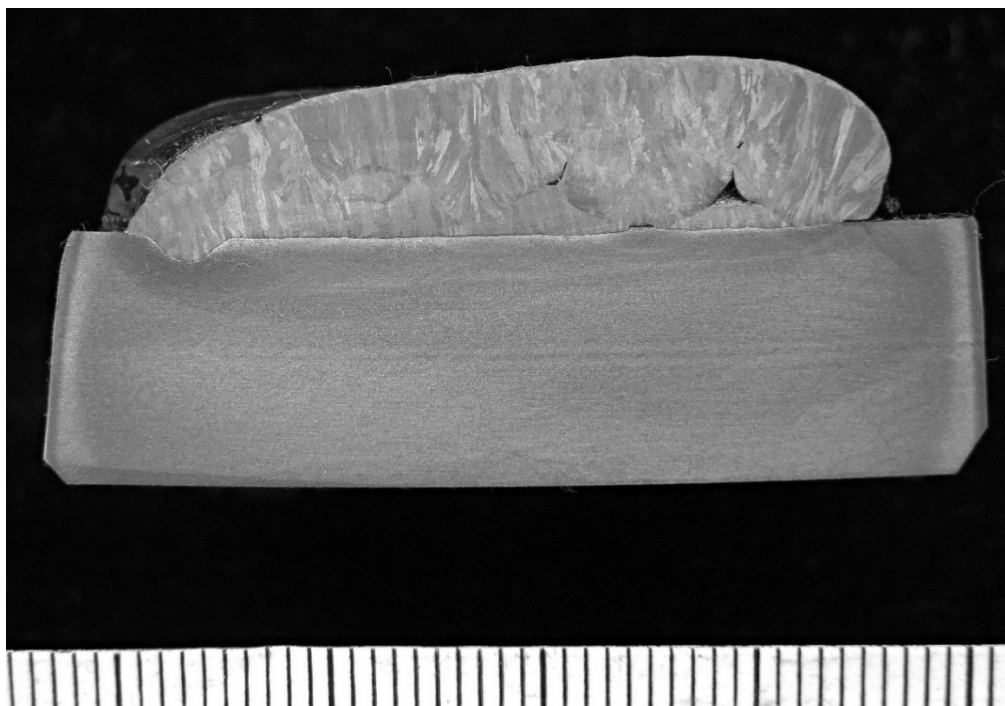
Skupina	A	B	C
Svařovací proud I [A]	175-190	135-150	145-160
Svařovací napětí U [V]	23	21	23,5
Korekce napětí m [V]	0	0	0,5
Svařovací rychlost v [mm.s⁻¹]	5	5	5
Vnesené teplo Q [kJ.mm⁻¹]	0,828	0,609	0,705



Obrázek 5.5 – Makrostruktura návaru skupiny A



Obrázek 5.6 – Makrostruktura návaru skupiny B



Obrázek 5.7 – Makrostruktura návaru skupiny C

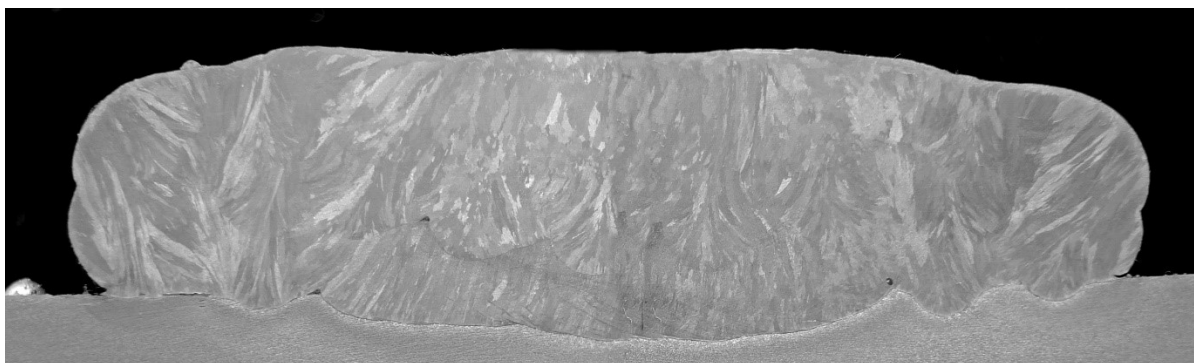
Podle makrostruktury bylo možné soudit, že průvar u skupiny C je nevyhovující. U této skupiny bylo vnesené teplo podle výpočtu vyšší než u skupiny B. Svařovací parametry skupiny C byly tak označeny za nevhodné a vyloučeny z možné volby. Průvar a zejména vzájemné spojení jednotlivých vrstev u skupin A a B bylo shledáno uspokojivým. Na základě nejnižšího vneseného tepla a zkratového přenosu kovu byly zvoleny parametry skupiny B jako nejvhodnější. U skupiny A bylo vyšší vnesené teplo a smíšený přenos kovu.

5.4 Ověření geometrických parametrů

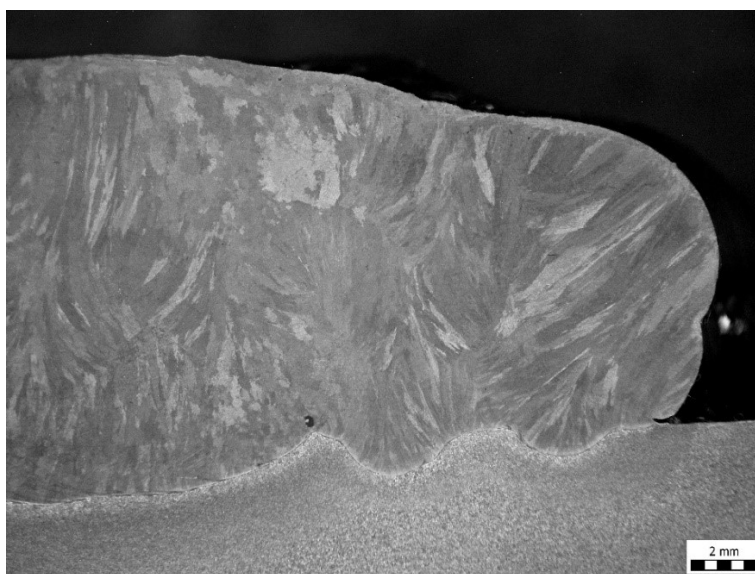
Geometrickými parametry je myšleno výška vrstvy a rozteč mezi osami vedle sebe ležících svarových housenek. U předchozích návarů byly řešeny pouze svařovací parametry, které měly jiné geometrické parametry. Proto byla ještě potřeba zhotovit návar s vhodnými geometrickými parametry a ověřit, jestli jsou tyto hodnoty v pořádku. Geometrické parametry byly zvoleny na základě předchozích zkušeností. Byl zhotoven jeden návar, kde byly použity svařovací parametry skupiny B. Zvolené geometrické parametry lze vidět v tabulce 5.7. Na základě hodnocení makrostruktury návaru byly parametry uspokojivé. V určitých místech se objevovali bubliny, ty však nepřekročily kritickou velikost. Ukázky makrostruktury lze vidět na obrázcích 5.8 a 5.9.

Tabulka 5.7 – Geometrické parametry

Výška vrstvy [mm]	3
Rozteč housenek [mm]	6



Obrázek 5.8 – Makrostruktura návaru



Obrázek 5.9 – Makrostruktura návaru

5.5 Destruktivní zkoušení návaru

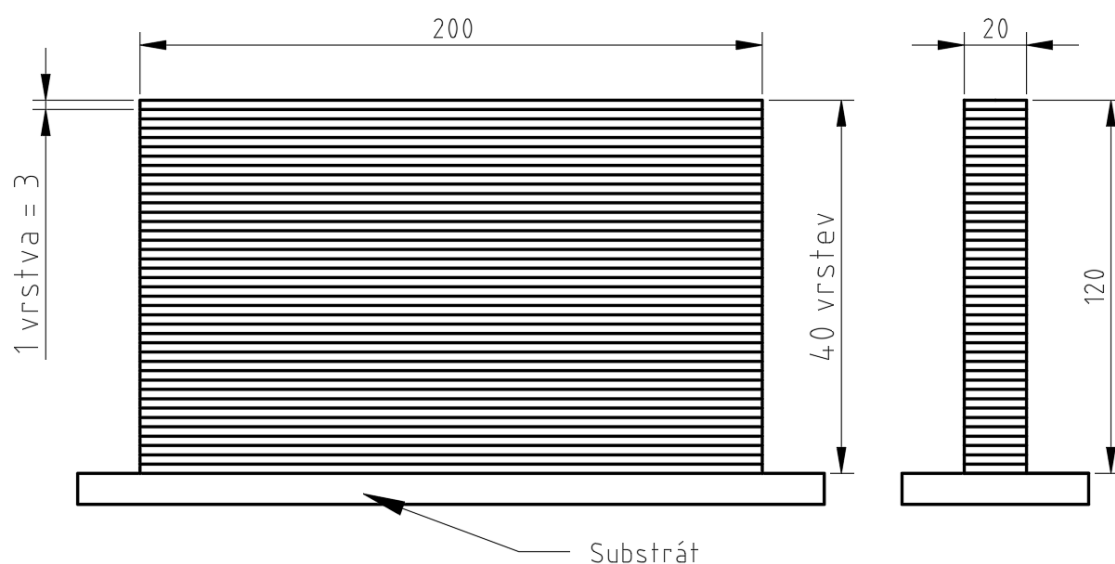
Svarový kov musí odpovídat určitým požadavkům, které jsou kladeny na vyráběnou součást. Proto poté, co byly zvoleny optimální parametry pro navařování, bylo nutné před zahájením výroby polotovaru ověřit spolehlivost návaru pomocí mechanického zkoušení. Pro ověření mechanických vlastností byly zvoleny tyto zkoušky:

- zkouška tahem,
- zkouška rázem v ohybu,
- zkouška ohybem.

Pro zhotovení vzorků byla navařena zkušební deska podle předepsaného postupu svařování (pWPS), který lze nalézt v příloze 3. Důležité údaje z pWPS jsou vypsány v tabulce 5.8. Návrh zkušební desky je pak vidět na obrázku 5.10. Po zhotovení zkušební desky (obrázek 5.11) byly vzorky odebrány a následně podrobeny zkoušení. Výsledky mechanických vlastností lze nalézt v příloze 4. Pro porovnání výsledných hodnot mechanického oceli byla zvolena ocel X2CrNiMo17-12-2 (316L), která má chemickým složením ke svařovacímu drátu G 19 12 3 L Si nejbližší.

Tabulka 5.8 – Výběr parametrů z pWPS (viz příloha 3)

Výrobce	VŠB-TUO	Poloha svařování	PA
Metoda svařování	135	Přídavný materiál	G 19 12 3 L Si
Způsob svařování	Robotické svařování	Způsob čištění	kartáčování, odmaštění
Druh svaru	Návar		
Vzor navařování			
Obrysový – počátek každé vrstvy bude začínat v libovolném bodě na uzavřené dráze			
<div><div></div></div>			
Průměr přídavného materiálu [mm]	1	Rychlost svařování [mm/s]	5
Svařovací proud [A]	135-150	Typ ochranného plynu	97,5 % Ar + 2,5 % CO2
Svařovací napětí [V]	20-21,5		
Druh proudu a polarita	DC (+)	Průtok ochranného plynu [l/min]	12
Režim	synergie	Teplota předehřevu	okolní teplota
Přenos kovu přídavného materiálu	zkratový	Teplota dohřevu	Bez dohřevu
		Teplota interpass [°C]	150
		Tepelné zpracování	Bez TZ



Obrázek 5.10 – Návrh zkušební desky (Substrát – navařovací podložka)



Obrázek 5.11 – Navařená zkušební deska

5.5.1 Zkouška tahem

Pro zkoušku tahem byly odebrány 2 zkušební tyče kruhového průřezu příčně na navařované vrstvy. Testování probíhalo podle normy ČSN EN ISO 6892-1 při teplotě 20 °C. Podstatou zkoušky je tahové namáhání zkušební tyče až do porušení. Pomocí této zkoušky lze zjistit hodnoty meze pevnosti R_m , meze kluzu R_e nebo smluvní meze kluzu $R_{p0,2}$, tažnosti A a kontrakce Z. Výsledné hodnoty z této zkoušky lze nalézt v tabulce 5.10.

Naměřené hodnoty by měly dosahovat vyšších hodnot, než jsou hodnoty mechanických vlastností oceli X2CrNiMo17-12-2 (316L). Pro mez kluzu $R_{p0,2}$ je nejnižší hodnota 190 Mpa. Tuto hodnotu převýšily oba vzorky s velkou rezervou. U meze pevnosti R_m je nejnižší hodnota 490 Mpa. Oba vzorky hodnotu převýšily. Nejnižší hodnota pro tažnost A je 30 %. Ani jeden vzorek požadavek nesplňoval. Hlavním úkolem zkoušky bylo ověřit mez kluzu a pevnosti, výsledky zkoušky byly tak vyhovující.

Tabulka 5.9 – Rozměry zkušebních tyčí pro zkoušku tahem

Zkušební tyč	Průměr [mm]		Průřez [mm ²]		Délka [mm]	
	Před zkouškou	Po zkoušce	Před zkouškou	Po zkoušce	Před zkouškou	Po zkoušce
T1	10	8,8	78,5	60,8	50	61,7
T2	10	8,4	78,5	55,4	50	63,7

Tabulka 5.10 – Výsledky tahové zkoušky

Zkušební tyč	Mez kluzu $R_{p0,2}$ [Mpa]	Mez pevnosti R_m [Mpa]	Tažnost A [%]	Kontrakce Z [%]	Výsledek zkoušky
T1	325	554	23,4	22,6	vyhovuje
T2	309	559	27,4	29,4	vyhovuje



Obrázek 5.12 – Zkušební tyče po tahové zkoušce

5.5.2 Zkouška rázem v ohybu

Pro zkoušku rázem v ohybu byly odebrány 3 zkušební tyče příčně na navařované vrstvy. Zkušební tyče měly vrub ve tvaru „V“. Testování probíhalo podle normy ČSN EN ISO 148-2 při teplotě 20 °C. Podstatou zkoušky rázem v ohybu je přeražení zkušební tyče jedním rázem kyvadlového kladiva z čehož je stanovena nárazová práce, která je měřítkem odolnosti proti rázovému namáhání. Výsledky zkoušky rázem v ohybu jsou uvedeny v tabulce 5.11.

U zkoušky rázem v ohybu musí průměr 3 testovaných vzorků být vyšší než nejnižší uvedená hodnota nárazové práce daného materiálu. Nejnižší hodnota nárazové práce u oceli X2CrNiMo17-12-2 (316L) je 60 J. Všechny 3 vzorky hodnotu překročily a výsledek zkoušky byl vyhovující.

Tabulka 5.11 – Výsledky zkoušky rázem v ohybu

Zkušební tyč	Typ tyče	Nárazová práce KV [J]	Průměrná hodnota [J]	Výsledek zkoušky
V1	KV2	112	111	vyhovuje
V2		119		
V3		102		



Obrázek 5.13 – Zkušební tyče po zkoušce rázem v ohybu

5.5.3 Zkouška ohybem

Pro zkoušku ohybem byly odebrány 2 zkušební tyče příčně na navařované vrstvy stejně jako u předchozích vzorků. Testování probíhalo podle normy ČSN EN ISO 7438 při teplotě 20 °C. Zkouška se používá pro zjištění plastických vlastností svarového spoje. Její podstatou je namáhání zkušební tyče na ohyb do vzniku trhlin o určité velikosti nebo dosažení předepsaného úhlu, v případě této zkoušky byl předepsaný úhel 180°. Výsledky zkoušky ohybem lze vidět v tabulce 5.13.

Bylo zjištěno, že se na obou vzorcích vyskytly trhliny (obrázek 5.15 a 5.16), které podle ČSN EN ISO 15614-1 by neměly překročit velikost 3mm. Hodnotu překročily oba odzkoušené vzorky a výsledek zkoušky byl nevyhovující.

Tabulka 5.12 – Rozměry zkušebních tyčí pro zkoušku ohybem

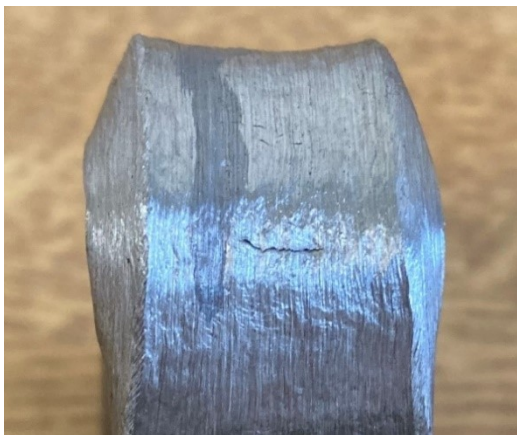
Zkušební tyč	Tloušťka [mm]	Šířka [mm]	Délka [mm]
O1	10	20	120
O2	10	20	120

Tabulka 5.13 – Výsledky zkoušky ohybem

Zkušební tyč	Průměr ohýbacího trnu [mm]	Vzdálenost mezi podpěrami [mm]	Úhel ohybu [°]	Druh a rozměry zjištěných vad	Výsledek zkoušky
O1	10	40	180	trhlina 4,2 mm	nevyhovuje
O2	10	40	180	trhlina 3,1 mm	nevyhovuje



Obrázek 5.14 – Zkušební tyč po zkoušce ohybem



Obrázek 5.15 – Trhlina na zkušební tyči O1

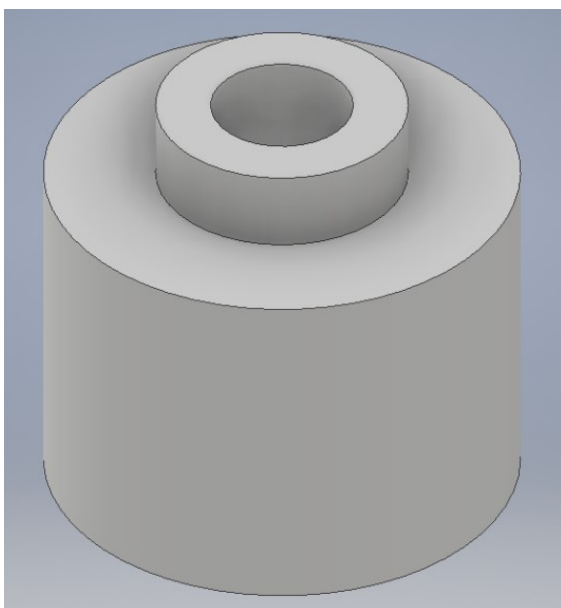


Obrázek 5.16 – Trhlina na zkušební tyči O2

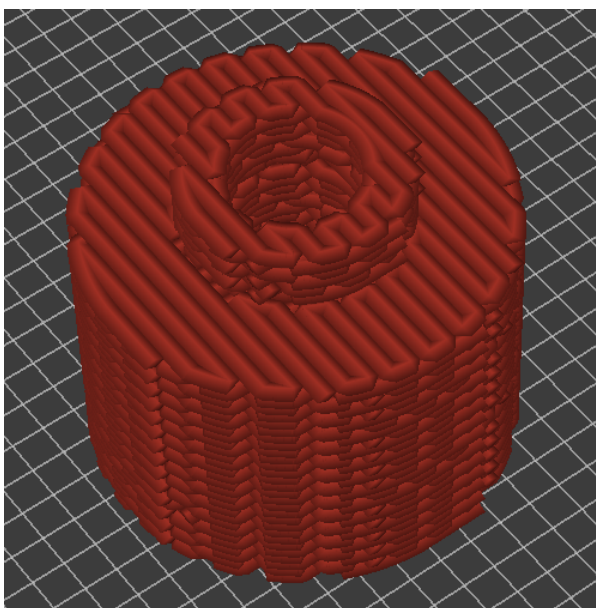
5.6 Výroba součásti

Po ověření mechanických vlastností svarového kovu, se mohlo přistoupit k výrobě polotovaru hrdla. Prvním krokem bylo vytvoření modelu polotovaru v programu Autodesk Inventor, který lze vidět na obrázku 5.17. Bylo navrženo, že polotovar bude mít přídavky na obrábění 10 mm na každý rozměr.

Následně byl 3D model z Inventoru vložen do programu PrusaSlicer. Zde se nejprve model umístil a orientoval do požadované pozice a pak rozdělil do vrstev, jak lze vidět na obrázku 5.18. V případě této diplomové práce byl polotovar rozdělen celkem do 35 vrstev. Výška vrstvy i rozteč svarových housenek odpovídala dříve ověřeným hodnotám (viz kapitola 5.4). Následně se vygenerovala dráha nástroje. Aby se předešlo anizotropii mechanických vlastností, každá sudá vrstva byla navařována v kolmém směru na směr navařování předchozí vrstvy. Poté byl vytvořen G-code.

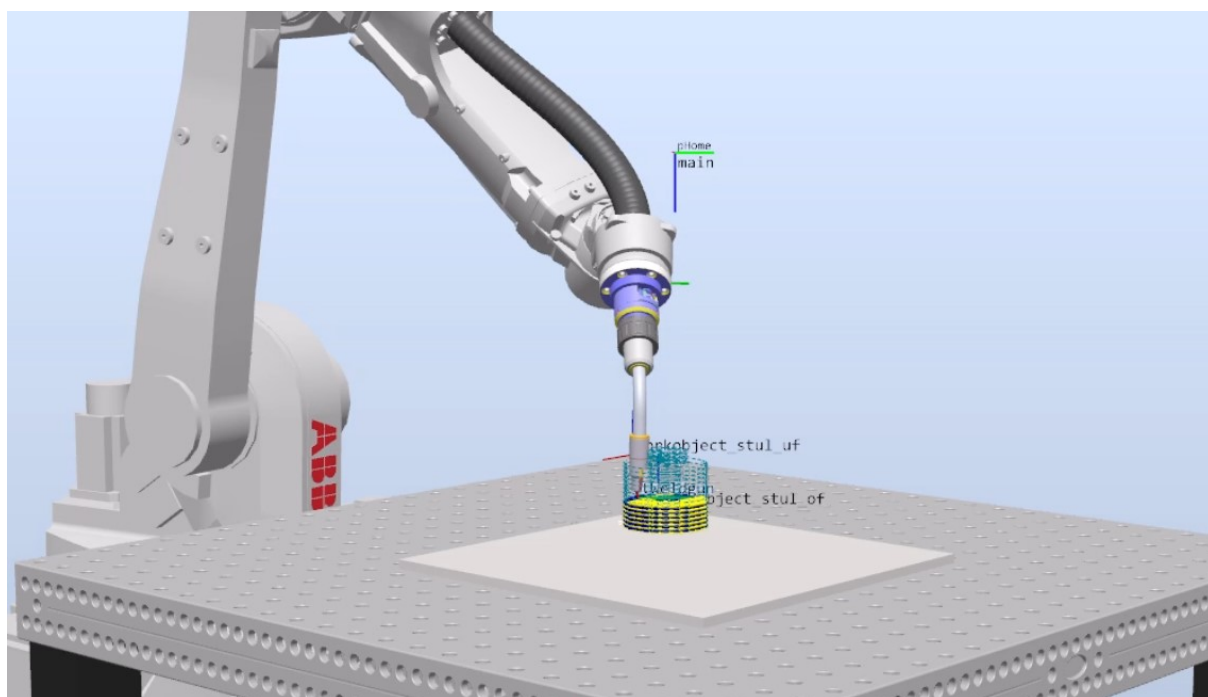


Obrázek 5.17 – 3D model polotovaru

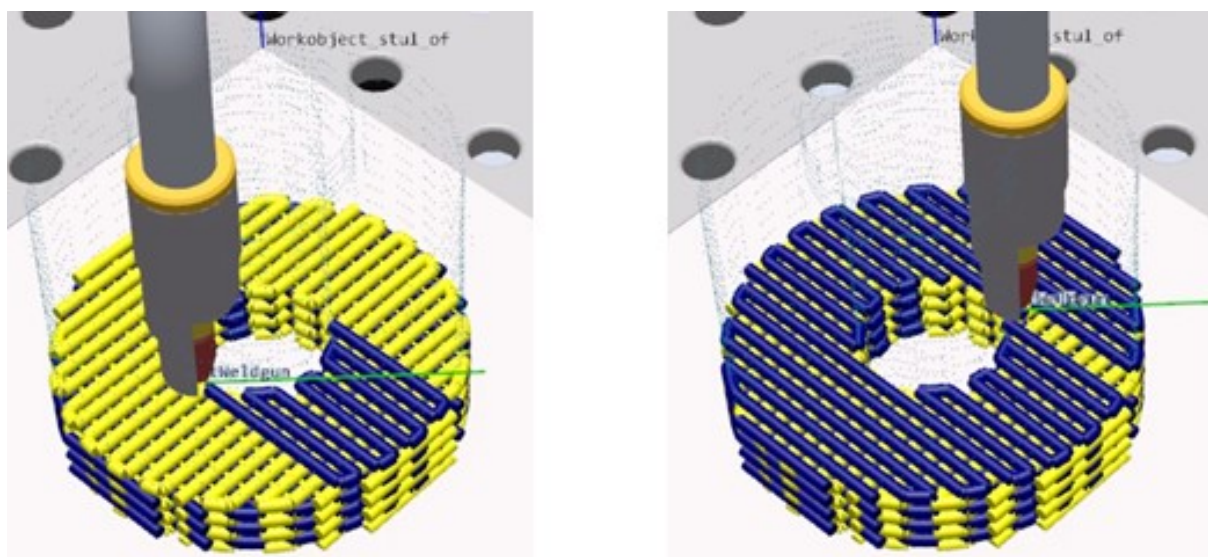


Obrázek 5.18 – 3D model rozřezaný do vrstev

G-code se importoval do programu RobotStudio. RobotStudio umožňuje off-line programování. Díky tomu lze do virtuálního prostoru přenést pracovní prostor, průmyslový robot a další komponenty, jak lze vidět na obrázku 5.19. Je tak možné zkontrolovat dráhu robotu a v případě potřeby ji lze dále upravovat. Na obrázku 5.20 je možné vidět simulaci pohybu svařovacího hořáku po předem nadefinované trajektorii v RobotStudiu.



Obrázek 5.19 – Prostředí RobotStudia



Obrázek 5.20 – Simulace dráhy navařování v RobotStudiu

Poté, co byly nastaveny všechny již ověřené parametry a dráha svařovacího hořáku, mohlo se přistoupit k navařování polotovaru. Každá vrstva po navaření byla očištěna ocelovým kartáčem a oklepávacím kladívkem. Pomocí dotykového teploměru se kontrolovala teplota navařených vrstev interpass (150 °C). Postup výroby polotovaru lze vidět na obrázcích 5.21 až 5.27. Po zhotovení polotovaru, byla odstraněna navařovací podložka, aby se polotovar mohl obrábět. To bylo provedeno ve společnosti MSA, a.s., Dolní Benešov. Hrubý polotovar je na obrázku 5.28 a finální součást na obrázcích 5.29 a 5.30.



Obrázek 5.21 – 1. vrstva polotovaru



Obrázek 5.22 – 2. vrstva polotovaru



Obrázek 5.23 – 9. vrstva polotovaru



Obrázek 5.24 – 9. vrstva polotovaru



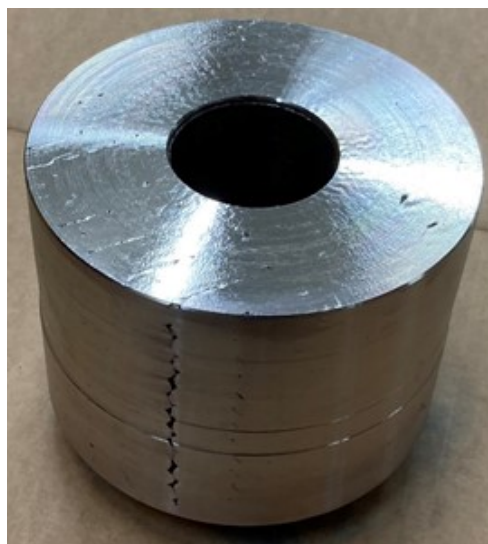
Obrázek 5.25 – 29. vrstva polotovaru



Obrázek 5.26 – 29. vrstva polotovaru



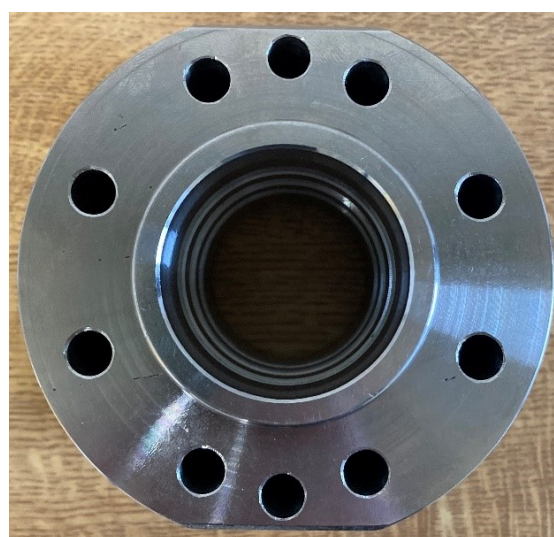
Obrázek 5.27 – Dokončený polotovár



Obrázek 5.28 – Ohrubovaný polotovár



Obrázek 5.29 – Finální součást



Obrázek 5.30 – Finální součást

5.7 Nedestruktivní zkoušky

Nedestruktivní zkoušky slouží ke zjištění případných vad ve svarech bez toho, aby došlo k porušení výrobku. Lze tak ověřit správnost postupu výroby. Nedestruktivní zkoušky byly provedeny ve společnosti MSA, a.s. certifikovaným pracovníkem. Bylo rozhodnuto, že nedestruktivní zkoušení bude probíhat po hrubém i finálním obrobení. V případě této experimentální části byly zvoleny tyto nedestruktivní zkoušky:

- vizuální kontrola,
- kapilární zkouška,
- rentgenová zkouška.

5.7.1 Vizuální kontrola

Vizuální kontrola se provádí před jakýmkoliv dalším zkoušením a slouží k předběžnému posouzení kvality svaru. Provádí se pouhým okem a kontrolují se povrchové vady. Vizuální kontrola byla provedena a vyhodnocena po hrubém i finálním obrobení podle normy ČSN EN ISO 5817, kritérium pro vyhodnocení bylo ve stupni C. Výsledky byly dokumentovány protokoly, které lze nalézt v příloze 5 a 6. Nejdůležitější informace o obou kontrolách jsou vypsány v tabulce 5.14.

Tabulka 5.14 – Záznam o vizuální kontrole

Prováděcí předpis	ČSN EN ISO 5817
Hodnocení dle	ČSN EN ISO 5817C
Certifikace pracovníka NDT	Z-SC-07613/VT3, Level III
Rozsah kontroly	100% povrchu
Použité zařízení pro kontrolu	přídavně světlo, lupa, měrky
Výsledek zkoušky po hrubém obrobení	Studené spoje – nevyhovující
Výsledek zkoušky po finálním obrobení	Studené spoje – nevyhovující

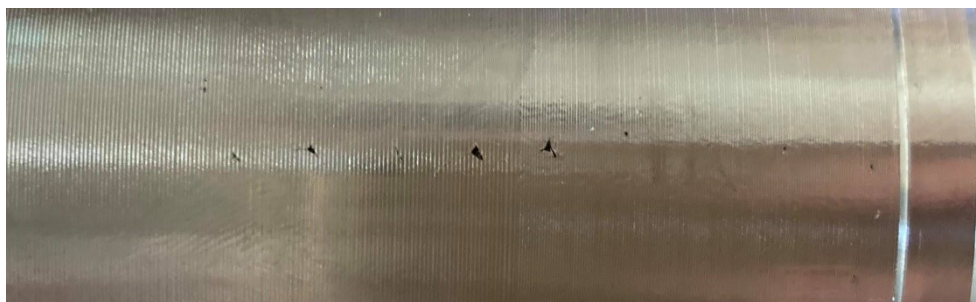
Vizuální kontrola po hrubém obrobení prokázala velký výskyt studených spojů (obrázek 5.31). Tyto vady byly význačné obzvláště v místech, kde svařovací hořák vyjíždí z vrstvy (obrázek 5.32). Studený spoj je nepřípustný ve všech případech, proto byl výsledek zkoušky po hrubém obrobení označen jako nevyhovující. Stejně byla vyhodnocena kontrola po finálním obrobení. Na součásti byly pořád studené spoje (obrázek 5.33 a 5.34), těch však výrazně ubylo.



Obrázek 5.31 – Povrch po hrubém obrobení



Obrázek 5.32 – Povrch po hrubém obrobení



Obrázek 5.33 – Studený spoj po finálním obrobení



Obrázek 5.34 . povrch po finálním obrobení

5.7.2 Kapilární zkouška

Kapilární zkouškou slouží ke zjišťování vad na povrchu. Její podstatou je zobrazení indikací pomocí kapaliny s vhodnými vlastnostmi a výrazným zbarvením. Zkouška byla provedena po hrubém i finálním obrobení podle normy ČSN EN ISO 31452-1 a vyhodnocena podle ČSN EN ISO 23277 ve stupni přípustnosti 1.

Před začátkem zkoušky byl povrch součásti pečlivě očištěn a usušen, aby nečistoty neovlivňovaly výsledek zkoušky. Poté byl na povrch nanesen penetrant (obrázek 5.35 a 5.37) a byl zde ponechán přibližně 10 min. Po této době se přebytek penetrantu odstranil, povrch se usušil a nanasla se rovnoměrná vrstva vývojky. Ihned po nanesení se povrch kontroloval. Po uplynutí vyvíjecího času, který byl asi 10 min, se povrch znova kontroloval a byl sepsán protokol. Stejný postup probíhal u obou zkoušek. Protokoly kapilárních zkoušek lze nalézt v příloze 7 a 8. Nejdůležitější informace z protokolů lze nalézt v tabulce 5.15.

Tabulka 5.15 – Záznam o kapilární zkoušce

Prováděcí předpis	ČSN EN ISO 3452-1
Hodnocení dle	ČSN EN ISO 23277 stupeň 1
Certifikace pracovníka NDT	Z-SC-07613/PT3, Level III
Rozsah kontroly	100% povrchu
Penetrační prostředky	MR311-R, MR79, MR70
Osvětlení	1520 Lx
Teplota	19 °C
Výsledek zkoušky po hrubém obrobení	studene spoje – nevyhovující
Výsledek zkoušky po finálním obrobení	studene spoje – nevyhovující

Výsledky kapilárních zkoušek potvrdily předchozí výsledky vizuální kontroly. Po hrubém obrobení se vyskytuje velké množství studených spojů v součásti (obrázek 5.36). Výsledek zkoušky byl proto označen jako nevyhovující. Po finálním obrobení indikací výrazně ubylo. Přesto se na součásti studené spoje objevují (obrázek 5.38, 5.39 a 5.40) a zkouška byla rovněž označena jako nevyhovující.



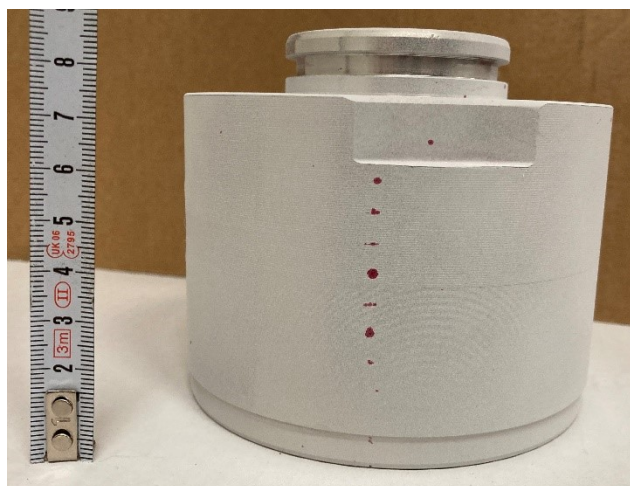
Obrázek 5.35 – Penetrant nanesený na polotovár po hrubém obrobení



Obrázek 5.36 – Vyvolané indikace po hrubém obrobení



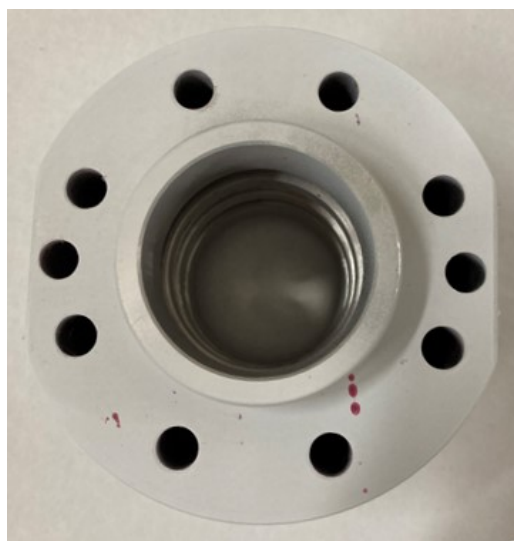
Obrázek 5.37 – Penetrant nanesený na součást



Obrázek 5.38 – Vyvolané indikace na součásti



Obrázek 5.39 – Vyvolané indikace na součásti

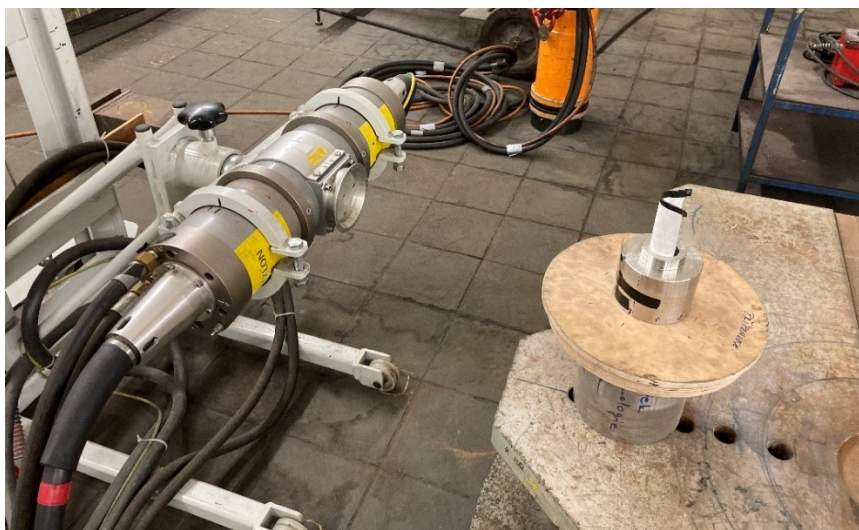


Obrázek 5.40 – Vyvolané indikace na součásti

5.7.3 Rentgenová zkouška

Pomocí rentgenové zkoušky lze zjistit vady pod povrchem. Je založena na schopnosti rentgenového nebo gama záření pronikat látkami. V místě vady je materiál zeslabený a absorbuje se tak méně záření. To se projeví na fotografickém filmu a získá se tak trvalý záznam vnitřních vad. Zkouška byla provedena po hrubém i finálním obrobení podle normy ČSN EN ISO 12681-1 a vyhodnocena podle ČSN EN ISO 10675-1 ve stupni přípustnosti 2.

U první zkoušky bylo zhotoveno celkově 5 snímků po obvodu součásti, u druhé pak 4. Před pořízením radiogramu byl každý snímek identifikován. Pro určení jakosti obrazu byla použita měrka 1ASTM B 11. Prozařování probíhalo přes 1 stěnu. Expoziční uspořádání lze vidět na obrázku 5.41. Po zhotovení radiogramů byly vyhodnoceny pomocí prosvětlovacího zařízení v zatemněné místnosti a byly zpracovány protokoly, které jsou uvedeny v příloze 9 a 10. V tabulce 5.16 jsou uvedeny nejdůležitější informace z protokolů.

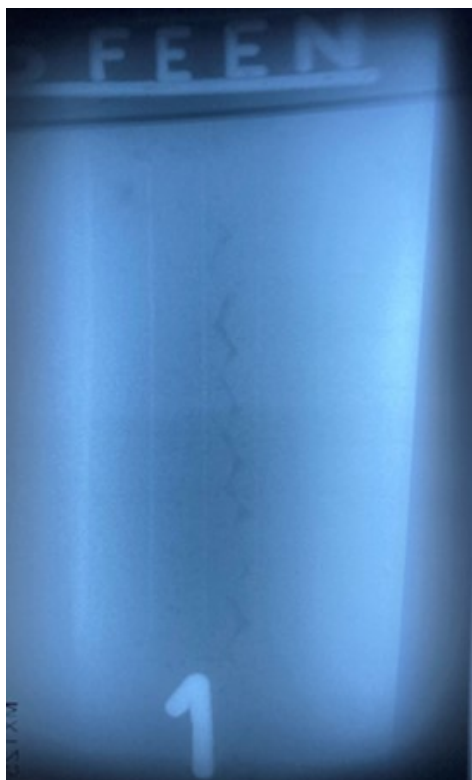


Obrázek 5.41 – Expoziční uspořádání rentgenové zkoušky

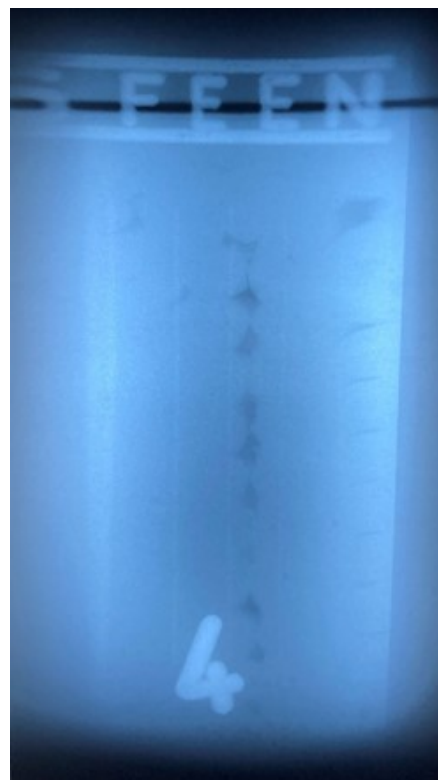
Tabulka 5.16 – Záznam o rentgenové zkoušce

Prováděcí předpis	ČSN EN ISO 12681-1
Hodnocení dle	ČSN EN ISO 10675-1. stupeň 2
Certifikace pracovníka NDT	Z-SC-07613/RT3, Level III
Rozsah kontroly	100%
Přístroj	YX 320
Prozařována tloušťka	35 mm
Velikost ohniska	3x3 mm
Fokus	650 mm
Film	MX 125
Měrka	1 ASTM B 11
Expozice	6 min
Výsledek zkoušky po hrubém obrobení	studene spoje – nevyhovující
Výsledek zkoušky po finálním obrobení	studene spoje – nevyhovující

Tato zkouška vyšla jako nevyhovující po hrubém i finálním obrábění. V obou případech se objevovaly studené spoje. Rentgenová zkouška naznačila, že se indikace vad vyskytují hlavně u povrchu součásti. Ukázky radiogramů ze zkoušky po hrubém obrobení lze vidět na obrázcích 5.42 a 5.43, po finálním obrobení pak na obrázcích 5.44 a 5.45.



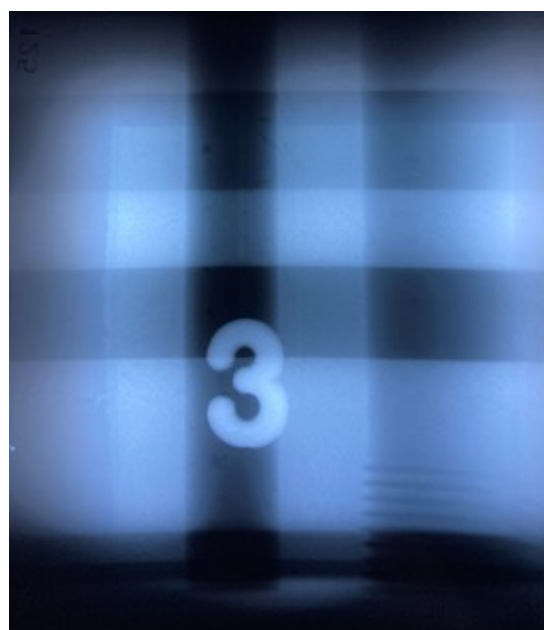
*Obrázek 5.42 – Radiogram č.1
zhotovený po hrubém obrobení*



*Obrázek 5.43 – Radiogram č.4
zhotovený po hrubém obrobení*



*Obrázek 5.44 – Radiogram č.1
zhotovený po finálním obrobení*



*Obrázek 5.45 – Radiogram č.3
zhotovený po finálním obrobení*

6 ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo zhotovit součást Hrdlo pomocí technologie WAAM a zhodnotit správnost daného postupu. K výrobě polotovaru pro součást Hrdlo bylo využito robotické pracoviště VŠB-TUO na katedře 345, které disponuje svařovacím robotem se svařovací technologií 135. Pro navařování byl vybrán svařovací drát Esab OK Autrod 316LSi, což je korozivzdorná austenitická ocel často využívaná pro aplikace aditivních technologií.

Na začátku experimentální části byly stanoveny svařovací a geometrické parametry navařování. Pro zvolení svařovacích parametrů byly zhotoveny 3 vzorky návarů. Byly měněny parametry svařovacího proudu, napětí a korekce napětí. Hlavními kritérii bylo spojení mezi vrstvami a vnesené teplo do svaru. Jako nejvhodnější byla zvolena skupina B s parametry: svařovací proud $I = 135-150\text{ A}$, svařovací napětí $U = 21\text{ V}$, korekce napětí $m = 0\text{ V}$, svařovací rychlost $v = 5\text{ mm/s}$ a vnesené teplo $Q = 0,609\text{ kJ/mm}$. U této skupiny byl průvar mezi vrstvami uspokojivý a vnesené teplo bylo nejnížší ze všech skupin. U stanovení geometrických parametrů se zhotovil pouze 1 návar. Byla zvolena výška vrstvy 3 mm a rozteč svarových housenek 6 mm.

Po stanovení parametrů bylo potřeba ověřit mechanické vlastnosti destruktivními zkouškami. Byla proto zhotovena zkušební deska podle vypracované pWPS, ze které se odebraly vzorky pro zkoušku tahem, rázem v ohybu a zkoušku ohybem. Tahová zkouška potvrdila, že návar dosahuje dobrých pevnostních vlastností. Oba vzorky překročily nejnižší udávanou hodnotu meze kluzu a pevnosti oceli X2CrNiMo17-12-2 (316L). Nejnížší udávanou hodnotu tažnosti zmíněné oceli nepřekročil ani jeden vzorek, plastické vlastnosti byly tedy u navařované součásti horší. To potvrdila ohybová zkouška, kde ani jeden vzorek nevyhovoval. V obou vzorcích byla trhлина větší než 3 mm. Pro zlepšení plastických vlastností bude potřeba optimalizovat parametry navařování nebo použít tepelné zpracování. To však zvyšuje náklady na výrobu, proto je snaha se mu vyhnout. Rázová zkouška ohybem vyšla jako vyhovující. Všechny vzorky překročily požadovanou hodnotu nárazové práce oceli X2CrNiMo17-12-2 (316L) a vykazovali tak dobrou odolnost proti rázovému namáhání.

Následně se přistoupilo k samotné výrobě. Nejprve byl zhotoven polotovar a pak byl dodán společnosti MSA, a.s., Dolní Benešov, která z něj zhotovila finální součást. Po hrubém i finálním obrobení byla součást podrobena nedestruktivnímu zkoušení. Bylo zjištěno, že velká část vad (převážně studené spoje) se objevuje v okrajových vrstvách návaru. Tyto vady mohou být způsobeny zvolenou trajektorií hořáku při navařování. V okrajové části nástroj mění směr, což může způsobovat komplikace. Velice významné vady se objevovaly v místě posunu hořáku o tloušťku 1 vrstvy. V budoucnu tak bude potřeba se zaměřit na vliv strategie navařování vrstev. Studené spoje se objevovaly také uvnitř součástí. To mohou způsobovat nevhodně nastavené geometrické parametry jako je rozteč mezi svarovými housenkami nebo míra překrytí svarových housenek, případně nedostatečné očištění jednotlivých vrstev. Další možností, jak předejít studeným spojům je vhodně změnit parametry svařovacího proudu nebo svařovací rychlosti v místě změny směru posunu hořáku. V případě výskytu pouze povrchových vad, by bylo možné tyto vady opravit například metodou 141.

7 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

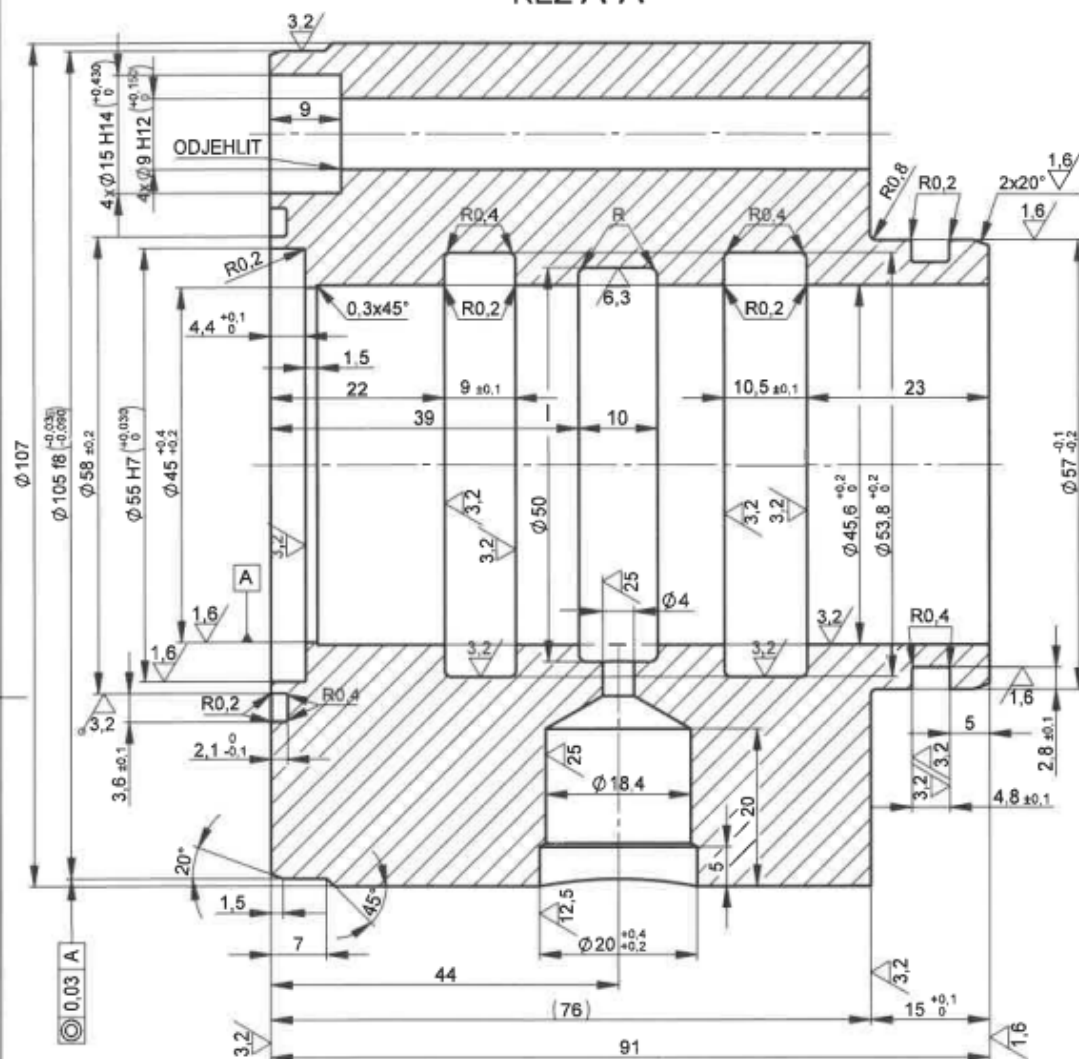
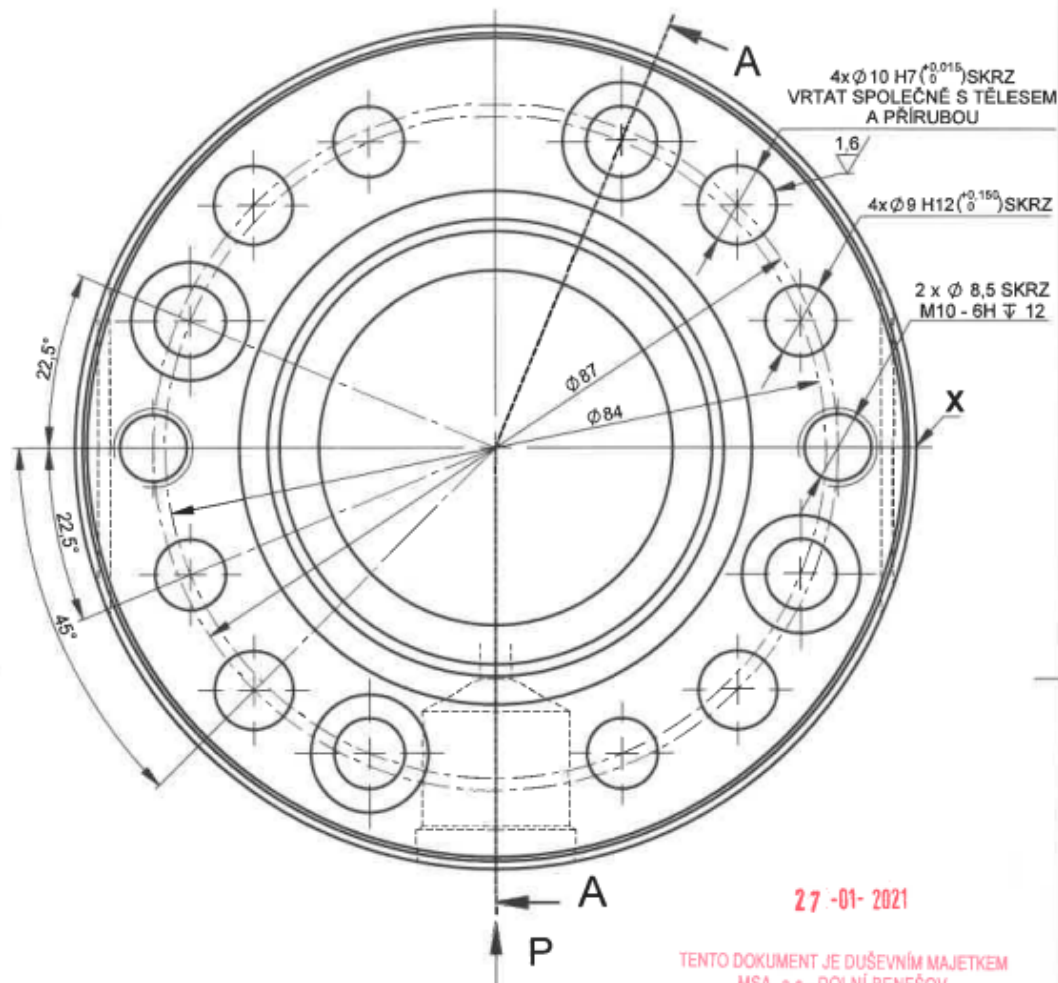
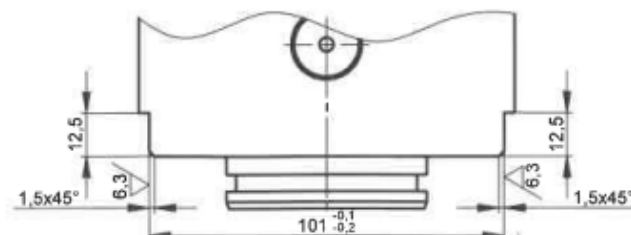
- [1] O'BRIEN, Annette. *Welding Handbook: Welding Processes, Part 1*. 9th ed. American Welding Society (AWS), 2004. ISBN 978-0-87171-729-0.
- [2] MALINA, Zdeněk. *Základní kurz svařování MIG/MAG*. 6th ed. Ostrava: Zeross, 2005.
- [3] WEMAN, Klas. *Welding Processes Handbook*. 2nd ed. Woodhead Publishing, 2012. ISBN 978-0-85709-510-7.
- [4] *Gas Metal Arc Welding: EW-473*. 3rd ed. Hobart Institute of Welding Technology, 2012. ISBN 978-1-936058-17-4.
- [5] JEFFUS, Larry. *Welding and Metal Fabrication*. Cengage Learning, 2012. ISBN 978-1-4180-1374-5.
- [6] AMBROŽ, Oldřich, Bohumil KANDUS a Jaroslav KUBÍČEK. *Technologie svařování a zařízení*. Ostrava: Zeross, 2001. ISBN 80-85771-81-0.
- [7] PHILLIPS, David. *Welding Engineering: An Introduction*. John Wiley, 2016. ISBN 978-1-118-76644-6.
- [8] MINAŘÍK, Václav. *Obloukové svařování*. Praha: Scientia, 2003. ISBN 80-7183-285-5.
- [9] GALVERY, William a Frank MARLOW. *Welding Essentials: Questions and Answers*. 2nd ed. Industrial Press, 2006. ISBN 978-0-8311-3301-6.
- [10] DOLEJSKÝ, Tomáš. *Základní kurz MIG/MAG*. 4th ed. Ostrava: Zeross, 2015. ISBN 80-86698-28-9.
- [11] O'BRIEN, Annette. *Welding Handbook: Materials and Applications*. 9th Ed. American Welding Society (AWS), 2011. ISBN 978-0-87171-759-7.
- [12] JENNEY, Cynthia L. a Annette O'BRIEN. *Welding Handbook: Welding Science and Technology*. 9th ed. American Welding Society (AWS), 2001. ISBN 978-0-87171-657-6.
- [13] KAH, P, M SHRESTHA, E HILTUNEN a J MARTIKAINEN. Robotic arc welding sensors and programming in industrial applications. *Materials and Engineering*. Finsko, 2015. Dostupné z: doi:10.1186/s40712-015-0042-y
- [14] SAUNDERS, Sarah. Using Robotic GMAW Additive Manufacturing to Make Metal Components for Industrial Applications. *3Dprint* [online]. 20.4.2020 [cit. 2021-03-04]. Dostupné z: <https://3dprint.com/264845/robotic-gmaw-am-to-make-metal-components-for-industrial-applications/>
- [15] GUPTA, A.K, S.K ARORA a W.J. RIESCHER. *Industrial Automation and Robotics*. Mercury Learning and Information, 2017. ISBN 978-1-938549-30-4.
- [16] RADHAKRISHNAN, P. *Computer Numerical Control Machines and Computer Aided Manufacture*. 2nd ed. New Academic Science, 2015. ISBN 978-1-78183-085-7.
- [17] SKAŘUPA, Jiří. *Průmyslové roboty a manipulátory* [online]. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2007 [cit. 2021-03-10]. ISBN 978-80-248-1522-0. Dostupné z: http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/PRM/Text/Skripta_PRaM.pdf

- [18] *Příručka: Automatizační a robotická technika* [online]. Košice: VITRALAB, 2011 [cit. 2021-03-10]. Dostupné z: http://www.sjf.tuke.sk/vitralab/files/vystupy/prirucka_cz_final.pdf
- [19] CUNNINGHAM, C.R., J.M. FLYNN, A. SHOKRANI, V. DHOKIA a S.T. NEWMAN. Strategies and processes for high quality wire arc additive manufacturing. *Additive Manufacturing*. Srpen 2018. ISSN 2214-8604.
- [20] WU, Bintao, Zengxi PAN, Donghong DING, Dominic DOMINIC CUIURI, Huijun LI, Jing XU a John JOHN NORRISH. A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement. *Journal of Manufacturing Processes*. říjen 2018. ISSN 1526-6125.
- [21] SINGH, Sudhanshu a Pradeep KHANNA. Wire arc additive manufacturing (WAAM): A new process to shape engineering materials. *Materials Today: Proceedings*. září 2020. ISSN 2214-7853.
- [22] RYAN, Emma. *On Wire and Arc Additive Manufacture of Aluminium*. Guildford, 2018. Disertační práce. University of Surrey. Vedoucí práce Dr Mark J. Whiting and Prof. John F. Watts.
- [23] PAN, Zengxi, Donghong DING, Bintao WU, Dominic CUIURI, Huijun LI a John NORRISH. Arc Welding Processes for Additive Manufacturing: A Review. *Transactions on Intelligent Welding Manufacturing*. 2018. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1007/978-981-10-5355-9_1
- [24] DING, Donghong, Zengxi PAN, Dominic Cuiuri CUIURI a Huijun LI. A practical path planning methodology for wire and arc additive manufacturing of thin-walled structures. *Robotics and Computer: Integrated Manufacturing*. 2015. ISSN 0736-5845. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.rcim.2015.01.003>.
- [25] DING, Donghong. *Process planning for robotic wire ARC additive manufacturing*. Wollongong, 2015. Disertační práce. University of Wollongong.
- [26] DONGHONG, Ding, Pan ZENGXI, Dominic CUIURI a Li HUIJUN. Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2015. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1007/s00170-015-7077-3>
- [27] RODRIGUES, Tiago, V. DUARTE, R.M. MIRANDA, Telmo SANTOS a J.P. OLIVEIRA. Current Status and Perspectives on Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM). *Materials*. 2019. Dostupné z: doi:10.3390/ma12071121
- [28] AMIRI, Sozaf. *Grain Refinement of Titanium Alloy: Ti-6Al-4V manufactured by Wire Arc Additive Manufacturing*. Brisbane, 2019. Diplomová práce. THE UNIVERSITY OF QUEENSLAND. Vedoucí práce Michael Bermingham.
- [29] SEOW, Cui E., Harry E. COULES, Guiyi WU, Raja H.U. KHAN, Xiangfang XU D a Stewart WILLIAMS. Wire + Arc Additively Manufactured Inconel 718: Effect of postdeposition heat treatments on microstructure and tensile properties. *Materials and Design*. 2019. ISSN 0264-1275. Dostupné z: doi:<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0264127519305957>

8 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 – Výkres 5866-561 – Hrdlo.....	55
Příloha 2 – Atest svařovacího drátu G 19 12 3 L Si.....	56
Příloha 3 – Předběžná specifikace postupu svařování	57
Příloha 4 – Protokol o zkoušení mechanických vlastností	58
Příloha 5 – Protokol vizuální kontroly po hrubém obrobení.....	61
Příloha 6 – Protokol vizuální kontroly po finálním obrobení	62
Příloha 7 – Protokol kapilární zkoušky po hrubém obrobení.....	63
Příloha 8 – Protokol kapilární zkoušky po finálním obrobení	64
Příloha 9 – Protokol rentgenové zkoušky po hrubém obrobení	65
Příloha 10 – Protokol rentgenové zkoušky po finálním obrobení.....	66

ŘEZ A-A

POHLED P
MĚŘITKO 2 : 3

27 -01- 2021

TENTO DOKUMENT JE DUŠEVNÍM MAJETKEM
MSA, a.s., DOLNÍ BENEŠOV
Jeho používání, rozmnožování nebo postou-
pení osobám bez svolení odpovědného pra-
covníka této a.s. je zakázáno a bude podle
zákonů trestáno.

NEŘÍZENÁ KOPIE

X.VYRAZIT (V=10mm, HL.=0,5-1mm)

- JAKOST
- Č.TAVBY
- ZNAK KONTROLY

RÁDIUSY S NEUVEDENOU HODNOTOU MOHOU BÝT MAX.R2mm.

PROMĚTÁNÍ	MATERIAL/ATEST: DLE TR	JMENO	POLOHOVAR	POZNÁMKA:
CHRAŇENO DLE ISO 16016	KRESLIL	Fajka, Martin	11.02.2019	VÝPOČTAR
PŘESNOST ČSN ISO 2768 - mK	PŘEDKOUŠEL			SCHVALA
TOLEROVANÍ ČSN ISO 8015	TECHNOLOG			AUTOR REVIZE
MSA A.S. DOLNÍ BENEŠOV	FORMÁT A3	NAZEV: HRDLO - US	ČÍSLO VÝKRESU: 5866-561	REVIZE 000
	SESTAVA-TYP K83.3	DN/NPS: 150	PN/CLASS: 100	STAV DOKUMENTU Informační
				MĚŘITKO 3:2
				HMOTNOST: 3.65



ZKUŠEBNÍ ZPRÁVA / TEST REPORT

v souladu s/acc to EN 10204 - 2.2

Datum/Date: 2020-07-27

Číslo certifikátu/Cert no: EC26100623 rev. 0

Naše objednávka/Our order:

Naše reference/Our ref:

Číslo zákazníka/Cust no:

Datum obj. zákazníka/Your date:

Stanislava Kraténová

CZB00046

Vaše objednávka/Your order:

Vaše reference/Your ref:

Vaše faxové číslo/Your fax:

Váš e-mail/Your e-mail:

Příjemce certifikátu/Cert receiver

DODÁVKA/DELIVERY

LOT číslo/Lot no:

PVU285586961

Množství/Quantity:

VÝROBEK/PRODUCT

Značka/Brand:

ESAB

Popis/Desc:

OK Autrod 316LSi 1.0mm 15kg

Číslo výrobku/Item no:

1632109820

KLASIFIKACE/CLASSIFICATIONS

EN ISO 14343-A: G 19 12 3 L Si

SFA/AWS A5.9: ER316LSi

Werkstoffnummer: ~1.4430

CHEMICKÉ SLOŽENÍ/ CHEMICAL COMPOSITION

Wire/strip

Ostatní/Auxiliary:

C	0.01%
Si	0.9%
Mn	1.8%
P	0.015%
S	0.010%
Cr	18.4%
Ni	12.2%
Mo	2.60%
Cu	0.12%
N	0.05%
Ferrite FN	10

MECHANICKÉ VLASTNOSTI/MECHANICAL PROPS

Standard/norma/Standard:

Ostatní/Auxiliary:

Stav/podmínky/Condition:

PEVNOST/TENSILE

Rp0.2 Rm A4-A5

450 MPa 600 MPa 35 %

ZKOUŠKA RÁZEM/IMPACT

Temp -60 °C -110 °C -196 °C

KV 95 J 70 J 45 J

KOMENTÁŘ/COMMENTS

Certificate complies with requirements specified in ASME Sec II C, ed. 2017 Schedule F

Výrobek je dodán podle programu QA, který splňuje normu EN ISO 9001.

Tento certifikát je zhotoven elektronicky a je platný bez podpisu.

Veškeré dotazy prosím adresujte na:

ESAB VAMBERK, s.r.o., Smetanovo náb. 334, Vamberk 517 54, tel. +420 494 501 476, order@esab.cz

Product supplied under a QA Programme fulfilling the EN ISO 9001 standard.

This certificate is produced electronically and is valid without signature.

Please refer any queries to: (see above)

Za správnost/Validation

Per-Ake Bjornstedt

Předběžná specifikace postupu svařování (pWPS) - obloukové svařování

Výrobce:	VŠB – TUO 17. listopadu 2172/15 708 00 Ostrava-Poruba	WPS schválil – svářečský dozor:	
Výrobek:	Hrdlo	Údaje o přípravě svarových ploch:	ISO 9692-1
Druh svaru:	Návar	Způsoby přípravy úkosu:	obrábění, broušení
Číslo dokladu (WPS):		Způsob čištění:	Kartáčování, odmaštění
Číslo WPQR:		Základní materiál:	
Číslo zkušebního kusu:		Metoda svařování:	135
Kvalifikační zkouška svářeče:		Poloha svařování:	PA

Tvar spoje a postup svařování: Obrysová metoda, počátek každé vrstvy bude začínat v libovolném bodě na uzavřené dráze

Parametry svařování			
Svarová housenka	1-n		
Metoda svařování	135		
Průměr příd. mat. [mm]	1		
Svařovací proud [A]	135-150		
Svařovací napětí [V]	20-21,5		
Druh proud a polarita	DC (+)		
Způsob přenosu kovu	zkratový		
Rychlost posuvu pojezdu [mm/s]	5		
Tepelný příkon [kJ/mm]	0,609		
Přídavný materiál:	G 19 12 3 L Si	Údaje o podložce:	
Předpis na sušení:		Další informace:	
Ochranný plyn/tavidlo:	97,5 % Ar + 2,5 % CO ₂	Údaje pro pulzní svařování:	
Průtok ochranného plynu [l/min]:	12	Údaje pro plazmové svařování:	
Wolfram. elektroda, druh/průměr:		Úhel nastavení hořáku:	
Údaje o drážkování kořene:		Druh automatu a svař. hlavy:	
Tepelné zpracování/stárnutí:	bez tz	Vady ve svaru:	stupeň jakosti dle ČSN EN ISO 5817
Doba, teplota, postup:	bez tz	Opravy svarů:	
Rychlost ohřevu a chlazení:	bez tz	Vzdálenost elektrody (kontaktní špičky) od základního mat. [mm]:	
Interpass teplota [°C]	150		
Podpis zástupce zhotovitele (datum, podpis, razítko):		Podpis zástupce objednatele (datum, podpis, razítko):	

Příloha 3 – Předběžná specifikace postupu svařování

VÍTKOVICE TESTING CENTER s.r.o.

Zkušební a laborator
Pohraniční 584/142
Hlučín

703 00 Ostrava

PROTOKOL O ZKOUŠENÍ

ke zkušebnímu listu č.

946.30/2019/04/C/01

Číslo protokolu
Strana č. / počet stran1823Ž21
1 / 3

ZÁKAZNÍK

VŠB-TU Ostrava
Katedra mechanické technologie - 345
Ing. Jindřich Kozák, Ph. D.
Fakulta strojní
17. listopadu 2172/15
708 33 Ostrava - Poruba
CZ

VZOREK č.: 8509
ROZMĚR (mm): 20 mm
MATERIÁL: 316LSI
TAVBA:
NORMA:

VÝKRES:

TZ:

POZNÁMKA:

Zakázka

Objednávka č. 10106662/345

Číslo zk. zařízení a měřidel
946.30/014 946.30/141
946.30/026 946.30/215
946.30/070 946.30/231
Zástupce přijímající organizace

ČSN EN ISO 7438
ČSN EN ISO 6892-1 A224
ČSN EN ISO 148-1

Rychlost do mez kluzu
Max. en. kladiva
300 J

Zkušební metody

QI-VTC.30 GEN-0007
QI-VTC.30 GEN-0004
QI-VTC.30 EVR-0005

Jiné požadavky

Tažnost A

Pevnost Rm [MPa]

Mez kluzu [MPa]

Teplota [°C]

Směr vlákna

Místo odběru

Uničtovací vzorek

Původ tavby

Druh výrobku

Tloušťka

Zkušební teplota

Materiál

Teplotní zpracování

Před zkouškou

Tloušťka

Šířka

Průřez

Délka

Po zkoušce

Tloušťka

Šířka

Průřez

Délka

mm

mm²

mm

mm

mm

mm

mm

mm

mm

mm

mm

mm

mm

mm

ZKOUŠKA OHYBEM

Vzdálenost mezi podpěrami

Průměr ohybového trnu

Měřená délka před zkouškou

Prodloužení po zkoušce

Druh a rozměry zjištěných vad

Konec výsledků

Konec výsledků

Konec výsledků

Konec výsledků

Konec výsledků

Konec výsledků

Konec výsledků

Konec výsledků

Konec výsledků

Konec výsledků

Konec výsledků

Konec výsledků

Konec výsledků

Konec výsledků

Konec výsledků

Konec výsledků

Konec výsledků

Konec výsledků

Konec výsledků

Konec výsledků

Konec výsledků

Konec výsledků

Konec výsledků

Konec výsledků

Konec výsledků

Konec výsledků

Konec výsledků



POZNÁMKY
Směr vlákna:
1 (U) - podélně
2 (Q) - příčně
3 (T) - tangenciálně
9 (N) - jiné případy
Údaje psané kurzívou jsou data dodaná zákazníkem
Datum přijetí: 3.3.2021

Funkce
Zkušební technik
Zkušební technik
Vedoucí ZMV

Jméno
Bc. Martin Kubica
Bc. Martin Kubica
Ing. Jiří Borkala

Podpis

Rok
Měs.
Den
21 03 08
21 03 08
21 03 08

Dosažené výsledky se týkají pouze zkoušené položky, vzorku, jak byl přijat.
Laborator neodpovídá za oděr vzorku a za data dodaná zákazníkem.
Protokol je možno reprodukovat pouze celý, jinak s písemným souhlasem laboratoře

Příloha 4 – Protokol o zkoušení mechanických vlastností, 3. část

MSA, a.s. DOLNÍ BENEŠOV	Protokol vizuální kontroly Visual test report Číslo/Number: 1370/2021		Datum: 9.4.2021 Date:
			Počet listů: 1/1 Number of sheets:
Název výrobku/typ: Name of product/ type:		Hrdlo	Projekt: VŠ Ostrava Project:
Výrobní příkaz: Production order:		-	Číslo výkresu: 5866-561 Drawing number:
Rozsah zkoušky: Extent of testing:		100% povrchu	Materiál: 316LSi Material:
Prováděcí předpis: Measurement regulation/ standard:		ČSN EN ISO 5817	
Hodnocení dle: Evaluation according to:		ČSN EN ISO 5817C	
Datum zkoušky: 8.4.2021 Date of testing:	Značka prac.: Ondřej Hanzlík Test inspector:	Razidlo: 2097 Stamp number:	
Výsledek zkoušky: Test result:			
Číslo kusu/tavba: Piece number/ heat:	Č. zkoušky: Test number:	Zkoušená partie: Test lot:	Výsledek zkoušky: Evaluation: ČSN EN ISO 5817C
1	1/21	100% povrchu	Studené spoje-Nevyhovující
Razítko, podpis, číslo certifikátu: Stamp, signature, certificate number:			



MSA, a.s. DOLNÍ BENEŠOV		Protokol vizuální kontroly Visual test report Číslo/Number: 1463/2021		Datum: 21.4.2021 Date: Počet listů: 1/1 Number of sheets:	
Název výrobku/typ: Name of product/ type:			Hrdlo		Projekt: VŠ Ostrava Project:
Výrobní příkaz: Production order:			-		Číslo výkresu: 5866-561 Drawing number:
Rozsah zkoušky: Extent of testing:			100% povrchu		Materiál: 316LSi Material:
Prováděcí předpis: Measurement regulation/ standard:			ČSN EN ISO 5817		
Hodnocení dle: Evaluation according to:			ČSN EN ISO 5817C		
Datum zkoušky: 21.4.2021 Date of testing:		Značka prac.: Ondřej Hanzlík Test inspector:		Razidlo: 2097 Stamp number:	
Výsledek zkoušky: Test result:			Nevyhovující		
Číslo kusu/tavba: Piece number/ heat:	Č. zkoušky: Test number:	Zkoušená partie: Test lot:	Výsledek zkoušky: Evaluation: ČSN EN ISO 5817C		
1	2/21	100% povrchu	Studené spoje-Nevyhovující		
Razítko, podpis, číslo certifikátu: Ondřej Hanzlík, Z-SC-07613/VT3, Level III Stamp, signature, certificate number:					



Příloha 6 – Protokol vizuální kontroly po finálním obrobení

MSA, a.s. DOLNÍ BENEŠOV	Protokol kapilární zkoušky Dye penetrant test report Číslo/Number: 1371/2021		Datum: 9.4.2021 Date: Počet listů: 1/1 Number of sheets:
Název výrobku/typ: Hrdlo Name of product/ type:		Projekt: VŠ Ostrava Project:	
Výrobní příkaz: - Production order:		Číslo výkresu: 5866-561 Drawing number:	
Rozsah zkoušky: 100% povrchu Extent of testing:		Materiál: 316LSi Material:	
Číslo postupu: - Procedure number:		Měrka: No. 1 Indicator:	
Penetrační prostředky: MR311-R, MR79, MR70 Penetrant:		Osvětlení: 1520Lx Illumination:	
Teplota: 19°C Test temperature:		Metoda: barevá Method:	
Prováděcí předpis/norma: ČSN EN ISO 3452-1 Measurement regulation/ standard:			
Hodnocení: ČSN EN ISO 23277 stupeň 1 Evaluation according to:			
Datum zkoušky: 8.4.2021 Date of testing:	Značka prac.: Ondřej Hanzlík Test inspector:	Razídko: 2097 Stamp number:	
Výsledek zkoušky: Nevyhovující Test result:			
Číslo kusu/tavba: Piece number/ heat:	Č. zkoušky: Test number:	Zkoušená partie: Test lot:	Výsledek zkoušky: Evaluation: ČSN EN ISO 23277 stupeň 1
1	1396/21	100% povrchu	Studené spoje-Nevyhovující
Razítko, podpis, číslo certifikátu: Ondřej Hanzlík, Z-SC-07613/PT3, Level III Stamp, signature, certificate number:			



Příloha 7 – Protokol kapilární zkoušky po hrubém obrobení

MSA, a.s. DOLNÍ BENEŠOV	Protokol kapilární zkoušky Dye penetrant test report Číslo/Number: 1461/2021		Datum: 21.4.2021 Date:	
			Počet listů: 1/1 Number of sheets:	
Název výrobku/typ: Name of product/ type:		Hrdlo		Projekt: VŠ Ostrava Project:
Výrobní příkaz: Production order:		-		Číslo výkresu: 5866-561 Drawing number:
Rozsah zkoušky: Extent of testing:		100% povrchu		Materiál: 316LSi Material:
Číslo postupu: Procedure number:		-		Měrka: No. 1 Indicator:
Penetrační prostředky: Penetrant:		MR311-R, MR79, MR70		Osvětlení: 1520Lx Illumination:
Teplota: Test temperature:		19°C		Metoda: barevá Method:
Prováděcí předpis/norma: Measurement regulation/ standard:		ČSN EN ISO 3452-1		
Hodnocení: Evaluation according to:		ČSN EN ISO 23277 stupeň 1		
Datum zkoušky: 21.4.2021 Date of testing:		Značka prac.: Ondřej Hanzlík Test inspector:	Razítko: 2097 Stamp number:	
Výsledek zkoušky: Test result:		Nevyhovující		
Číslo kusu/tavba: Piece number/ heat:	Č. zkoušky: Test number:	Zkoušená partie: Test lot:	Výsledek zkoušky: Evaluation: ČSN EN ISO 23277 stupeň 1	
1	1547/21	100% povrchu	Studené spoje-Nevyhovující	
Razítko, podpis, číslo certifikátu: Stamp, signature, certificate number:		Ondřej Hanzlík, Z-SC-07613/PT3, Level III		



Příloha 8 – Protokol kapilární zkoušky po finálním obrobení

MSA, a.s. DOLNÍ BENEŠOV		Protokol rentgenových zkoušek Radiographic test report Číslo / Number: 1372/2021		Datum: 9.4.2021 Date: Počet listů: 1/1 Number of sheets:	
Název výrobku/typ: Name of product/ type:			Hrdlo		Projekt: VŠ Ostrava Project:
Výrobní příkaz: Production order:			-		Číslo výkresu: 5866-561 Drawing number:
Název součásti: Test lot:			-		Počet kusů: 1 Quantity:
Rozsah zkoušky: 100% Extent of testing:		Materiál: 316LSi Material:		Prozařovaná tloušťka: 35mm Radiographed thickness:	
Číslo procedury: Procedure number:			-		Měrka: 1 ASTM B 11 IQI:
Velikost ohniska: 3x3mm Radiation source:		Fokus: 650mm Focal spot:		Aktivita: - Activity:	
Přístroj: YX 320 Device:	kV:	kV:	mA:	mA:	Expozice: 6min Exposure:
Film: MX 125 Film:	Folie: 0,027/0,027mm Screen:	Hodnocení: Nevyhovující Test result:			
Datum zkoušky: 8.4.2021 Date of testing:		Značka prac.: Ondřej Hanzlík Test inspector: Z-SC-07613		Razidlo: 2097 Stamp number:	
Předpis k měření/norma: Measurement regulation/ standard:			ČSN EN ISO 12681-1		
Hodnocení dle: Evaluation according to:			ČSN EN ISO 10675-1, stupeň 2		
Číslo kusu/tavba: Piece number/ heat:	Č. zkoušky: Test number:	Zkoušená partie: Test lot:	Výsledek zkoušky: Evaluation: ČSN EN ISO 10675-1, stupeň 2		
1	1838-1842/21	100%	Studené spoje-Nevyhovující		
Razítko, podpis, číslo certifikátu: Stamp, signature, certificate number:			Ondřej Hanzlík, Z-SC-07613/RT3, Level III		



MSA, a.s. DOLNÍ BENEŠOV		Protokol rentgenových zkoušek Radiographic test report Číslo / Number: 1462/2021		Datum: 21.4.2021 Date: Počet listů: 1/1 Number of sheets:	
Název výrobku/typ: Name of product/ type:			Hrdlo		Projekt: VŠ Ostrava Project:
Výrobní příkaz: Production order:			-		Číslo výkresu: 5866-561 Drawing number:
Název součásti: Test lot:			-		Počet kusů: 1 Quantity:
Rozsah zkoušky: 100% Extent of testing:		Materiál: 316LSi Material:		Prozařovaná tloušťka: 35mm Radiographed thickness:	
Číslo procedury: Procedure number:			-		Měrka: 1 ASTM B 11 IQI:
Velikost ohniska: 3x3mm Radiation source:		Fokus: 650mm Focal spot:		Aktivita: - Activity:	
Přístroj: YX 320 Device:		kV:	mA:	Expozice: 6min Exposure:	
Film: MX 125 Film:		Folie: 0,027/0,027mm Screen:		Hodnocení: Nevyhovující Test result:	
Datum zkoušky: 21.4.2021 Date of testing:		Značka prac.: Ondřej Hanzlík Test inspector: Z-SC-07613		Razídko: 2097 Stamp number:	
Předpis k měření/norma: Measurement regulation/ standard:			ČSN EN ISO 12681-1		
Hodnocení dle: Evaluation according to:			ČSN EN ISO 10675-1, stupeň 2		
Číslo kusu/tavba: Piece number/ heat:	Č. zkoušky: Test number:	Zkoušená partie: Test lot:	Výsledek zkoušky: Evaluation: ČSN EN ISO 10675-1, stupeň 2		
1	1939-1942/21	100%	Studené spoje-Nevyhovující		
Razítko, podpis, číslo certifikátu: Stamp, signature, certificate number:			Ondřej Hanzlík, Z-SC-07613/RT3, Level III		



Příloha 10 – Protokol rentgenové zkoušky po finálním obrobení